



Digitized by Google

TRAITÉ

DE

L'EXPLOITATION DES MINES.

Digitized by Google

FÉLIX OUDART, RUE St-HUBERT, 3.

Digitized by Google

4. 1. 261

TRAITÉ

DE

L'EXPLOITATION DES MINES

PAR

M. Ch. COMBES,

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES, PROFESSEUR D'EXPLOITATION
A L'ÉCOLE ROYALE DES MINES.

TOME PREMIER.

LIÉGE.
DOMINIQUE AVANZO ET Cie.
TYPOGRAPHIE DE FELIX OUDART.
MDCCCXLIV

Digitized by Google

Digitized by Google

AVANT-PROPOS.

Le seul traité complet que nous ayons sur la science et la pratique de l'art des mines, est la traduction par M. Schreiber, de l'ouvrage de Delius, qui fut publié à Vienne en 1778. La Richesse minérale de M. Héron de Villefosse, qui nous a fait connaître l'ensemble des travaux des mines les plus importantes du continent européen, et les procédés en usage vers le commencement de ce siècle, ne peut cependant tenir lieu d'un traité méthodique d'exploitation. D'ailleurs, presque toutes les machines employées dans les mines ont reçu, depuis la publication de ce grand ouvrage, d'importantes améliorations : la pratique a été modifiée jusque dans ses détails les plus simples, tels que le tirage des rochers à la poudre, la forme des outils de sondage, etc. Les perfectionnements successivement apportés à toutes les branches de l'art des mines ont été l'objet de mémoires spéciaux imprimés généralement dans des recueils périodiques, tels que le *Journal* et les *Annales des*

Digitized by Google

Mines, l'*Archiv de Karsten*, le *Journal* et l'*Annuaire des mines* de Freyberg, et beaucoup d'autres journaux scientifiques et industriels, qui ne sont pas exclusivement relatifs aux mines.

Cet ouvrage, malgré les imperfections et les lacunes que je n'aurai pu éviter, répondra donc à un besoin réel de l'industrie. Je n'ai rien négligé pour me procurer une connaissance exacte des méthodes les plus perfectionnées qui soient actuellement en usage. Je les ai décrites avec les détails nécessaires pour les mettre à la portée des directeurs de mines, ou des contre-maîtres qui auront quelques connaissances de géométrie élémentaire. J'ai soumis, autant que je l'ai pu, ces méthodes à une discussion fondée sur les principes généraux de la physique et de la mécanique; j'ai présenté, sous une forme aussi élémentaire que le sujet le comportait, les notions essentielles sur la résistance des matériaux, et les machines qui sont le plus fréquemment employées dans les mines. J'espère donc que mon livre pourra être consulté avec fruit par les ingénieurs et par les directeurs d'établissements, qui auraient profité de l'instruction donnée dans les écoles des mines de Paris et de Sainte-Etienne, ou l'école centrale des arts et manufactures, et par les simples praticiens, qui, ne s'attachant qu'aux résultats et aux énoncés des règles à suivre, pourront facilement les isoler des détails plus scientifiques.

Les figures de l'atlas sont presque toutes pourvues d'une échelle, et représentent en général avec fidélité des machines ou des constructions existantes.

J'ai cité, dans chaque occasion, les noms des auteurs dont j'ai consulté les ouvrages; s'il y avait à cet égard quelque omission involontaire, j'en demande pardon d'avance. J'ajouterai que j'ai suivi, à peu de chose près, dans l'exposition des matières, l'ordre de mon cours à l'école royale des mines, ordre qui diffère très-peu de celui qu'avait adopté mon respectable professeur, M. Baillet de Belloi. Je me fais un devoir de reconnaître ici que je dois beaucoup au souvenir de ses leçons, et aux nombreux mémoires qu'il a publiés dans le Journal des mines.

Digitized by Google

TRAITÉ

DE

L'EXPLOITATION DES MINES.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES ET DÉFINITIONS.

Gisements. — Les roches, ou masses minérales qui constituent l'écorce du globe accessible aux travaux de l'homme, sont distribuées en groupes distincts, que les géologues appellent *terrains*.

Les minéraux utiles, susceptibles d'être exploités avec bénéfice, forment, dans les terrains, soit seuls, soit associés avec d'autres matières, des masses diversement limitées, qui reçoivent le nom générique de *gîte* ou *gisement*, et les dénominations particulières de couches, filons, veines, amas, etc., suivant leur forme, et leur manière d'être dans le terrain où elles se rencontrent.

Les matières inutiles ou stériles associées aux minéraux qui sont l'objet de l'exploitation, se nomment *gangues*.

Les terrains se divisent, d'après leur mode de structure, en deux grandes classes, les terrains *stratifiés*, et les terrains *non stratifiés*.

Couches. — Les terrains *stratifiés* sont ainsi appelés, parce qu'ils se composent d'assises superposées, limitées par des surfaces à peu près parallèles entre elles. Ces assises se nomment en général *couches* : on les appelle quelquefois *bancs* ou *lits*. La dénomination de *bancs* est plus particulièrement affectée aux couches épaisses de pierres de taille, d'ardoises ou autres matériaux qui sont employés dans les constructions; celle de *lits* n'est guère appliquée qu'à des couches minces. Les couches sont horizontales ou inclinées à l'horizon sous un angle quel-

conque, le plus ordinairement planes, au moins dans la plus grande partie de leur étendue, mais fréquemment aussi repliées, plissées ou ondulées. Sauf les accidents locaux, la composition et la structure sont assez uniformes dans l'étendue d'une même couche.

L'absence de *stratification*, et une tendance prononcée des roches qui les composent à l'état cristallin, caractérisent les terrains *non stratifiés*.

Beaucoup de matières exploitées se trouvent en couches, notamment la houille et tous les combustibles minéraux, les ardoises, la plupart des pierres de taille.

On distingue dans une couche :

1° *Sa direction.* C'est celle d'une ligne horizontale tracée dans le plan de la couche, ou plus généralement dans un plan tangent à la couche. Elle est donnée par l'angle que cette ligne forme avec la partie du plan méridien dirigée vers le nord, angle que l'on exprime en degrés sexagésimaux, ou en heures, dont chacune est la douzième partie de la demi-circonférence (1).

2° *Son inclinaison.* C'est l'angle compris entre le plan de la couche et le plan horizontal. Il a pour mesure l'angle plan compris entre la ligne tracée dans la couche, perpendiculairement à la direction, et la

(1) La direction peut toujours être donnée par un angle aigu compris entre 0 degré et 90 degrés, ou 0 heure et 6 heures, auquel on joint l'indication de la région *est* ou *ouest*, dans laquelle est comprise la ligne qui forme, avec la partie du méridien dirigée vers le nord, l'angle aigu énoncé en degrés ou heures. On donne cependant assez souvent une direction par un angle obtus. Mais lorsqu'on dit, par exemple, qu'une couche est dirigée sur 120 degrés, ou 8 heures Est, c'est comme si l'on disait qu'elle est dirigée sur 30 degrés, ou 8 heures Ouest. Les valeurs des deux angles aigu et obtus qui peuvent être pris pour indiquer une même direction, diffèrent entre eux de 90 degrés, ou 6 heures, et ces angles sont compris dans les deux régions séparées par le méridien.

On pourrait convenir de compter toujours les angles avec le méridien dans un même sens, en tournant du nord vers l'est. Dans ce cas, les valeurs des angles par lesquels une même direction serait indiquée, différeraient entre elles de 180 degrés ou 12 heures, et il serait inutile de joindre à l'énonciation de l'angle, l'indication de la région est ou ouest, dans laquelle serait comprise la ligne formant avec le méridien l'angle énoncé. Cette manière de compter les angles est la plus commode pour les levés de plans; mais elle est peu usitée dans les ouvrages de géologie, et dans le langage ordinaire.

projection horizontale de cette ligne. A la valeur de cet angle comprise entre 0 et 90°, on joint l'indication du sens de l'inclinaison vers l'un des quatre points cardinaux.

3° *Sa puissance.* C'est l'épaisseur de la couche, mesurée par une perpendiculaire commune aux deux surfaces limites.

4° *Son toit et son mur.* On appelle toit la surface limite supérieure, et mur, la surface limite inférieure, ou plus ordinairement on désigne par ces expressions les masses contiguës à la couche, dont l'une la recouvre et l'autre la supporte.

5° *Son affleurement.* C'est la partie de la couche qui se montre au jour.

L'inclinaison des couches qui ne sont pas planes varie d'un point à l'autre. Ces couches peuvent être représentées graphiquement, par une suite de lignes de niveau, résultant des intersections du plan de la couche, on plutôt d'une des surfaces limites par une série de plans horizontaux équidistants, jointes à des profils ou sections par des plans verticaux parallèles. On peut suppléer aux profils avec avantage, en traçant sur les lignes de niveau des flèches, dont la pointe indique le sens de l'inclinaison an point où elles sont tracées, et près desquelles on écrit les nombres qui expriment les grandeurs des inclinaisons respectives en degrés.

Accidents des couches. — On voit fréquemment des couches planes et à peu près horizontales dans la plus grande partie de leur étendue, se relever et se plisser vers les limites des terrains inférieurs sur lesquels elles s'appuient. Quand elles sont ainsi circonscrites de toute part, elles ont, vues en grand, la forme d'une cuvette ou d'un fond de bateau. Il y a aussi des terrains composés de couches plissées dans toute leur étendue, et qui présentent une série alternative de *selles* et de *fonds de bateau*, dont les axes rectilignes ou légèrement courbes sont à peu près parallèles entre eux : dans ce cas les selles les plus proéminentes des couches supérieures ont pu être détruites en totalité, ou partiellement, par le creusement des vallées existantes dans le pays, tandis que les couches inférieures, qui n'ont pas été atteintes par les mêmes dégradations, se continuent sans interruption et attestent la continuité primitive des premières. Les terrains houillers nous offrent des exemples nombreux de ces deux genres de contournements. La *Pl. I*, *fig.* 1, représente une section du terrain houiller des environs de Mons, par une ligne dirigée du nord au sud. On voit que les couches ont la forme d'un fond de bateau très-large, allongé de l'est à l'ouest, et dont les bords se relèvent au nord et au sud, là où le terrain houiller proprement dit s'appuie sur les calcaires inférieurs. Au

sud le relèvement est brusque et accompagné de plis tellement prononcés que les couches sont renversées, de manière à ce que le toit se trouve en dessous et le mur en dessus.

Les mineurs de la Belgique et du nord de la France appellent *plateurs* ou *plats* les portions de couches sensiblement horizontales, et donnent le nom de *droits* ou *dressants* à celles dont l'inclinaison se rapproche de 90°. Dans quelques districts, les dénominations opposées de *dressant* et de *plateur* ne sont pas relatives aux degrés d'inclinaison des parties de couches, mais plutôt à la position respective des assises qui se trouvent au toit et au mur de ces parties. Ainsi les *dressants* ont respectivement *au-dessus* et *au-dessous* d'eux les assises qui sont au contraire *au-dessous* et *au-dessus* des *plateurs*, et *vice versâ*, quels que soient d'ailleurs les degrés d'inclinaison des parties de couches en dressant ou en plateur. La diversité de nature des assises entre lesquelles est comprise une couche exploitée, suffit très-souvent pour qu'on puisse distinguer à ce seul caractère un dressant d'une plateur.

La couche de houille très-puissante exploitée près de Decazeville (Aveyron) présente une suite de plis allongés du nord au sud, et dont les axes sont légèrement inclinés vers le nord. Elle est subdivisée en plusieurs parties par des masses de schistes ou de grès qui, tantôt ont plusieurs mètres d'épaisseur et forment en apparence des couches distinctes et à parois parallèles, tantôt se réduisent à de simples lits minces intercalés dans la couche de houille. Les affleurements de ce système se développent sur les flancs des montagnes avec des inclinaisons et des directions diverses. Leur continuité est interrompue par les vallées profondes qui sillonnent la contrée, et l'on a regardé ces affleurements comme appartenant à des systèmes de couches différents, entre lesquels on n'apercevait aucune relation, jusqu'à ce que les travaux très-étendus, exécutés dans ces dernières années, aient mis hors de doute l'identité, et même la continuité des couches exploitées, depuis Sérons, Lasalle, Paleyret et Lavaysse, jusqu'à Firmy.

Les couches sont sujettes à des renflements et à des amincissements locaux, à des *brouillages*, à des variations dans la structure et la nature des matières qui les composent. Leur continuité est quelquefois brusquement interrompue par des fissures ou des fentes remplies qui traversent tout l'ensemble du terrain dont elles font partie: ces fentes se nomment *failles* ou *crains*. On donne le nom de *dykes*, emprunté au langage des mineurs et des géologues anglais, à celles qui sont remplies par des roches basaltiques, trappéennes ou porphyriques, semblables à celles qui constituent la masse de certains terrains non stratifiés, dont l'origine ignée est évidente.

Les amincissements des couches sont quelquefois poussés à leur extrême limite ; c'est-à-dire que le toit et le mur se rapprochent tout à fait, et ne laissent entre eux que de faibles indices de la couche intermédiaire, qui peuvent même disparaître entièrement. Ces amincissements sont suivis de renflements. Les gîtes d'anthracite exploités dans les départements de la Sarthe et de la Mayenne présentent, dans presque toute leur étendue, une suite d'accidents de ce genre. Dans les terrains houillers proprement dits, il n'est pas rare que les amincissements se trouvent près des plis, aux points où les couches de houille changent d'inclinaison ou de direction d'une manière assez brusque. La *fig.* 5, *Pl I*, est une section verticale par un plan normal à la direction, de la principale couche de houille exploitée près de Rive-de-Gier (Loire), dans l'espace compris entre les territoires des Verchères et du Mouillon. Le terrain houiller se réduit, dans la vallée du Gier, à une bande étroite dirigée du sud-ouest ou nord-est, à peu près comme la vallée, et qui s'appuie au nord et au sud sur des montagnes primitives. La couche, sensiblement horizontale vers le milieu de cette bande, se relève au nord et au midi où le terrain vient s'adosser au terrain ancien. Le relèvement au midi est très-brusque et accompagné de brouillages, qui dénaturent tout à fait le gisement. Au nord, entre les Verchères et le Mouillon, le relèvement est moins brusque ; mais la puissance de la couche, qui est, dans le milieu du bassin, de 10 à 12 mètres, est réduite à 0m,50 et même moins, sur quelques points, dans la partie la plus inclinée qui correspond au bord septentrional de la vallée. Après cet amincissement la couche se dilate de nouveau et s'étend, avec une inclinaison médiocre, sous le plateau presque horizontal du Mouillon, où ont eu lieu les plus anciennes exploitations de la contrée.

Les *brouillages* sont de divers genres. Ils paraissent le plus souvent résulter d'un mélange des matières qui constituent le toit et le mur, avec celles de la couche exploitée, de sorte qu'on peut croire qu'ils sont le résultat d'une ancienne rupture peu étendue des couches superposées, dont les fragments se seraient mêlés ensemble. Ce mélange est quelquefois tel qu'il dénature tout à fait la couche exploitée.

Indépendamment de ces brouillages circonscrits dans un petit espace, les couches sont quelquefois modifiées dans leur nature ou leur structure, sur des étendues considérables. Ainsi l'on a des couches subdivisées par des *nerfs*, ou lits de roches stériles, dont l'épaisseur, d'abord assez petite et uniforme, augmente graduellement de manière à transformer ces *nerfs* en assises épaisses, qui partagent la couche

en plusieurs autres qu'il faut exploiter isolément. Les accidents de ce genre peuvent être aussi considérés comme la réunion de plusieurs couches exploitables en une seule, par suite de l'amincissement des couches stériles intermédiaires. On les rencontre très-fréquemment dans les couches de houille dont la puissance est considérable. Nous rappellerons l'exemple déjà cité des couches exploitées à Decazeville.

Le mode d'agrégation est aussi sujet à varier. Ainsi des couches composées d'un grès très-solide ne présentent, dans certaines parties, qu'un sable désagrégé.

La nature même des parties constituantes est modifiée ou même tout à fait changée. Ainsi dans les terrains houillers, on voit quelquefois des schistes bitumineux remplacer la houille. L'exploitation d'une couche de houille, dans la mine de Lagrange, près Decazeville, offre un exemple très-remarquable d'un accident de ce genre. La houille y est brusquement remplacée par du minerai de fer carbonaté compacte et rubanné. A l'endroit où cette substitution s'est opérée, le toit et le mur de la couche ont conservé leur allure, sans la plus légère modification. La masse de fer carbonaté, dont la découverte tout à fait accidentelle est due aux travaux d'exploitation de la houille, se termine par un contour arrondi en demi-cylindre qui est enveloppé de toutes parts par la houille, ainsi que l'indique la *fig.* 6, *Pl. I. a.* houille ; *b.* fer carbonaté compacte.

Failles. — Les *Failles* sont de véritables filons stériles que le mineur considère uniquement sous le point de vue du dérangement qu'ils occasionnent dans les couches traversées. Ce dérangement n'est pas borné à une simple disjonction, avec écartement des parties; il y a en outre une dislocation très-prononcée du terrain. Il arrive en effet presque toujours, que les deux parties du terrain séparées par la fissure ou faille, ont éprouvé un déplacement relatif, un glissement l'une sur l'autre, qui a eu pour effet de mettre en regard des parties de couches, séparées l'une de l'autre, dans l'ensemble du terrain, par des intervalles plus ou moins considérables. Il en résulte que le prolongement d'une couche interrompue par une faille, se retrouve au delà de celle-ci, à un niveau différent, à droite ou à gauche, et presque jamais vis-à-vis. C'est ce que l'on exprime en disant que la couche est rejetée par la faille.

Nous dirons, à l'occasion des filons, ce que l'expérience a appris sur le sens du déplacement relatif des deux masses disjointes.

La largeur des failles varie depuis quelques millimètres, jusqu'à plusieurs mètres.

Celles qui traversent les terrains houillers, où elles sont fréquentes,

sont le plus ordinairement remplies d'une argile tendre avec fragments des couches interrompues. Souvent aussi elles sont remplies de roches *trappéennes* ou porphyriques. La rencontre de failles remplies d'argile amène assez souvent des sources abondantes, dues aux infiltrations des eaux superficielles entre les parois de la fente et l'argile qui la remplit.

On trouve dans l'Atlas de la richesse Minérale, un grand nombre d'exemples de failles bien caractérisées. La *fig.* 2, *Pl. I*, est une coupe, empruntée à un mémoire de M. Bnddle, du terrain houiller des environs de Newcastle (1). La direction de cette coupe est à peu près nord-sud; l'échelle des distances verticales est double de celle des distances horizontales, de sorte que les pentes des couches sont doubles, dans la figure, de ce qu'elles sont dans la réalité. La ligne ***a***, ***a***, ***a***, représente la couche de houille dite ***high main coal***, grande couche supérieure; elle est immédiatement recouverte par un banc de grès puissant, dit ***Main Post.*** Neuf autres couches de houille parallèles ont été reconnues par les puits d'exploitation. La partie de cette section qui est au sud de la Tyne, sous le marais de Jarrow, sur une longueur d'environ 55 fathoms (100 mètres), n'a pas été explorée directement, et a été tracée d'après les travaux exécutés sur d'autres points du voisinage. La ligne ***a***, ***a***, ***a*** représentant la grande couche supérieure servira d'horizon, pour suivre les dislocations occasionnées par les nombreux dykes, ou failles, qui interrompent la continuité de toutes les couches. En partant du point le plus profond au sud, sous l'étang dit Jarrow Slake, la grande couche High main coal, s'élève suivant un angle de 10 degrés; elle est d'abord coupée par un premier dyke qui la relève, ainsi que toutes les assises du terrain, de 12 pieds anglais (3^m,76), et puis par un second dyke qui la relève encore de 6 fathoms (10^m,97). Près de la rive gauche de la Tyne un autre dyke coupe le terrain, et rejette les couches de 15 fathoms (27^m,20) vers le bas. De là la couche s'étend sans interruption, et avec une pente sensiblement uniforme, jusqu'à une distance d'environ 500 yards (457 mètres) au nord du puits Percy. Ici l'inclinaison augmente brusquement, ce qui forme une sorte de *dressant* dont l'étendue suivant l'inclinaison est de 140 yards (127^m,80); puis la couche reprend son allure ordinaire, jusqu'à un dyke que l'on rencontre à 200 yards au nord du puits Chirton, et qui relève tout le terrain de 40 fathoms (73^m,16). Dans l'intervalle de 150 yards (228^m,50) compris entre ce

---

(1) ***Transactions de la Société d'histoire naturelle du Northumberland, Durham et Newcastle-sur-Tyne.***

dyke et un autre situé plus au nord, la couche *high main* n'existe plus; on n'y retrouve que les assises du terrain et les couches de houille inférieures. La couche rejetée ainsi *au-dessus de la surface* par le dyke de 40 fathoms reparaît au nord d'un autre dyke qui rejette les assises de 11 fathoms (20m,11) vers le bas. De là elle s'étend presque horizontalement, et à une profondeur médiocre au-dessous de la surface du sol jusqu'au grand dykc, *main dyke*, qui rejette le terrain de 140 fathoms vers le bas. Au nord du grand dyke, la couche, située à une grande profondeur, se relève suivant un plan fortement incliné sur une étendue d'un demi-mille (900 mètres environ); l'inclinaison diminue ensuite graduellement; la couche devient enfin sensiblement horizontale, et prend même par places une petite inclinaison vers le nord, ainsi qu'on le voit dans les houillères de Holywell et de Blackworth. Près du village de Holywell, qui n'est pas représenté dans la section *fig.* 2, la couche est encore interrompue par le dyke dit *briar dean-burne dyke* qui la rejette de 35 fathoms (64 mètres) vers le bas.

La *fig.* 3, *Pl. I*, est une section du terrain houiller de Ronchamp (Haute-Saône), que je dois à l'obligeance de M. Thirria. Les couches de houille exploitées sont coupées brusquement par une masse porphyrique, suivant une ligne formant un angle peu considérable avec leur direction. Des sondages exécutés dans la plaine de Champagney au delà du point où les couches ont été interrompues, ont découvert, à ce qu'il paraît, les assises du grès rouge au-dessous de l'alluvion de cailloux roulés qui couvre le sol de cette plaine, et au-dessous de quelques bancs de grès rouge, la masse porphyrique qui paraît former une proéminence de forme irrégulière. Le terrain houiller et les couches de houille n'ont pas été retrouvés.

La *fig.* 4, *Pl. I*, représente une section du bassin houiller de Ségure, dans le département de l'Aude, que nous empruntons à la Description géologique de la France, par MM. Dufrénoy et Élie de Beaumont. Ici les proéminences porphyriques qui traversent le terrain houiller à la manière des filons, s'élèvent au-dessus de la surface en forme de crêtes ou de pitons.

Filons. — Un *filon* est une masse d'une épaisseur plus ou moins grande, mais toujours très-petite par rapport aux deux autres dimensions qui sont indéfinies, différente des roches dans lesquelles elle est encaissée, tant par la nature, que par la structure et l'état d'agrégation des substances qui la composent. Cette masse s'étend fréquemment dans plusieurs terrains différents; dans les terrains stratifiés, elle coupe habituellement les couches; quelquefois aussi elle est intercalée entre elles, et ne s'en distingue alors que par la composition

et la structure, qui sont généralement fort différentes pour les filons et les couches (1). Tandis que celles-ci forment un tout assez homogène, les premiers sont au contraire remplis de matières très-diverses. On y rencontre, avec des fragments anguleux de roches isolés, ou agglomérés entre eux, des argiles, des cavités dont l'intérieur est tapissé de cristaux, des minerais métalliques en masses cristallines tapissant l'intérieur de cavités, ou bien en veinules irrégulières serpentant au milieu de la masse, etc. On a remarqué fréquemment dans les filons une structure par zones ou bandes, disposées symétriquement de part et d'autre d'un plan parallèle aux deux parois encaissantes, et divisant le gîte en deux parties égales.

On distingue dans un filon, comme dans une couche, la *direction*, l'*inclinaison*, la *puissance*, le *toit*, le *mur*, l'*affleurement*. Le toit et le mur sont aussi appelés les *épontes* du filon.

Beaucoup de filons sont nettement séparés de leurs épontes, pour lesquelles ils n'ont presque aucune adhérence; il existe alors entre la masse du filon et chacune des parois un lit d'argile tendre dont les mineurs profitent pour abattre plus facilement la masse à exploiter. Ces lits d'argile contigus aux parois se nomment *salbandes*. Il y a aussi des filons dont la matière se fond, pour ainsi dire, dans la roche encaissante, de sorte qu'il serait impossible de dire précisément où finit le filon et où commencent les épontes. Beaucoup de filons sont l'objet d'exploitations utiles. D'autres sont connus des mineurs, comme interrompant la continuité des couches qu'ils exploitent, et reçoivent alors la dénomination particulière de *failles*.

Lorsqu'un filon coupe les couches d'un terrain stratifié, si l'on examine les couches des deux côtés de ce filon, on trouve qu'elles sont, de part et d'autre, superposées dans le même ordre, que le plus souvent leur direction et leur inclinaison sont peu ou ne sont pas du tout modifiées, mais que généralement les couches d'un côté ne se trouvent pas sur le prolongement des mêmes couches du côté opposé. Presque toujours les couches du côté du toit se trouvent à un niveau plus bas que du côté du mur, comme si la masse du toit avait glissé sur la masse du mur suivant la ligne de plus grande pente. C'est ainsi que

(1) Les filons intercalés entre les couches reçoivent quelquefois la dénomination particulière de veines. Les mineurs et les géologues anglais appellent *lode* les filons qui coupent les couches du terrain encaissant, et *veins* les filons ou gîtes intercalés à peu près parallèlement aux couches.

lorsqu'il se fait un éboulement sur les bords d'une tranchée profonde, creusée dans des terrains tendres, le terrain se fendille parallèlement à l'axe de la tranchée, suivant des plans de rupture inclinés vers celle-ci, et les masses situées du côté de la tranchée, glissent sur ces plans de rupture. Si les terrains dont il s'agit sont stratifiés, et si la cohésion des masses détachées n'est pas entièrement détruite, on aura une image assez exacte du genre de dislocation de terrain qui accompagne le plus habituellement les filons (1).

Accidents des filons. — Les filons sont sujets, comme les couches, à des inflexions, des amincissements, des étranglements et des brouillages : ces accidents y sont même plus fréquents que dans les couches. Ils sont également sujets à être interrompus par d'autres filons. Dans ces sortes de rencontres de deux filons, celui qui se continue sans interruption est appelé *filon croiseur* ou *croiseur;* l'autre s'appelle le filon *croisé*,

Dans certains terrains stratifiés, on a remarqué que les amincissements et les brouillages se trouvent précisément dans les parties où le filon est encaissé dans certains bancs de roche; c'est ce qui arrive notamment aux filons de plomb du Derbyshire qui traversent un terrain calcaire, entre les assises duquel sont intercalées des masses d'une roche trappéenne à laquelle les géologues et les mineurs anglais donnent le nom de *toadstone* (pierre de crapaud). Les filons exploités dans les assises calcaires où ils sont puissants et réguliers, s'amincissent dans les masses de toadstone, à tel point que l'on a cru d'abord qu'ils étaient entièrement interrompus par cette roche. La continuité à travers le toadstone paraît aujourd'hui bien constatée. Les filons de plomb du Cumberland, exploités dans un terrain composé de couches calcaires, alternant avec des couches de grès et de schiste argileux, et qui contient une masse de trapp intercalée, sont aussi en général moins puissants dans les couches schisteuses et dans les couches de grès que dans les assises calcaires. L'abondance du minerai de plomb dans les filons est aussi plus grande, dans les parties où ils sont encaissés dans le calcaire. Enfin il est remarquable que les filons, presque verticaux dans les assises calcaires, coupent oblique-

(1) La comparaison que nous faisons entre le résultat d'éboulements de terre et les dislocations qui accompagnent les filons, a seulement pour but de donner une idée simple des apparences que présentent les faits observés, sans que nous entendions attribuer les deux genres de faits aux mêmes causes.

ment les bancs de grès et de roches schisteuses, ce qui donne à la section de ces filons, par un plan vertical perpendiculaire à leur direction, la forme d'un escalier, genre de structure qui se retrouve encore dans d'autres contrées, et que Werner avait observée au filon de Halsbrükner-Spath, près Freyberg.

Les filons présentent, dans leur étendue, de grandes variations de richesses en minerai, et dans beaucoup de localités, l'enrichissement ou l'appauvrissement d'un filon semblent avoir une corrélation avec la nature de la roche dans laquelle il est encaissé. Ainsi les filons de plomb du Cumberland que nous avons déjà cités, sont plus riches dans les assises calcaires que dans les assises de grès, et surtout que dans le schiste où ils sont presque toujours entièrement stériles. Leur richesse augmente particulièrement dans certains bancs calcaires.

Dans le Cornwall, où des filons métalliques traversent fréquemment une roche schisteuse appelée *killas*, le granit sur lequel elle est appuyée, et de grandes masses d'une roche porphyrique appelée *elvan*, qui constituent elles-mêmes, dans le terrain, d'énormes filons ou dykes, on a remarqué que les filons, riches là où ils sont encaissés dans le killas, sont entièrement stériles dans le granit, bien qu'ils se prolongent dans cette roche régulièrement et avec la puissance qu'ils avaient auparavant; plus rarement des filons riches dans le granit s'appauvrissent en pénétrant dans le killas, ou l'elvan. Enfin la richesse paraît surtout augmenter, pour quelques-uns de ces filons, dans les parties encaissées dans certains bancs de killas.

Il arrive souvent qu'un filon pousse dans le terrain qui constitue ses épontes, des ramifications ou veines assez étendues et puissantes, pour être exploitées comme des filons séparés, et qui se réunissent de nouveau au filon, à une distance plus ou moins grande du point où elles s'en étaient détachées. Souvent aussi un filon productif est accompagné d'autres filons affectant à peu près la même direction, et situés à une petite distance, dans la région du toit ou dans celle du mur. Indépendamment de ces filons latéraux qui semblent des annexes d'un filon principal, il est très-ordinaire qu'un filon métallifère n'existe pas seul dans la contrée où il se trouve : le plus souvent on y rencontre plusieurs autres filons contenant des minerais de même nature, et dans ce cas les directions et les inclinaisons de tous ces filons, séparés par de grands intervalles, sont à peu près parallèles, de sorte que l'on est conduit à les regarder comme formant un ensemble ou *système de filons*. Certaines contrées sont ainsi sillonnées par deux ou plusieurs systèmes de filons. L'on remarque alors que les filons des divers systèmes, qui se distinguent par leurs directions, diffèrent

aussi généralement par la nature des substances qu'ils contiennent. Enfin tous les filons d'un même système croisent tous les filons d'un autre système, ou sont croisés par ceux-ci.

Lorsqu'un filon est coupé par un *croiseur*, le filon croisé est habituellement rejeté, et l'observation prouve que le rejet a lieu le plus souvent, comme s'il était le résultat du glissement en masse de la région du toit sur la région du mur du croiseur.

Les mineurs disent d'un filon ou d'une couche interrompus par un croiseur ou une faille, qu'ils sont rejetés *horizontalement* ou *verticalement*. Presque toujours le rejet a lieu à la fois dans le sens horizontal et dans le sens vertical, c'est-à-dire qu'il est possible de retrouver le gîte interrompu, au delà du filon ou de la faille, soit en cheminant horizontalement, soit en marchant de haut en bas, ou de bas en haut suivant la ligne de plus grande pente du croiseur. Le rejet dans le sens horizontal n'est pas nécessairement le résultat d'un déplacement relatif dans ce sens, des deux parties du terrain séparées par le croiseur. Il peut tout aussi bien résulter d'un déplacement relatif suivant la ligne de plus grande pente, ainsi que cela sera expliqué, lorsque nous exposerons les règles à suivre dans la recherche du prolongement des gîtes interrompus.

Amas. — On appelle *amas* des masses minérales de forme irrégulière, le plus souvent ovale ou arrondie, qui se rencontrent, soit dans les terrains en couches, soit dans les terrains non stratifiés; en un mot on désigne par cette dénomination tous les gîtes de minéraux utiles qui ne sont ni en couches ni en filons. Les amas sont souvent des expansions de filons.

On distingue les *amas entrelacés* ou *stockwerks*, qui consistent en masses de roches pénétrées d'un grand nombre de veinules de minerais métalliques, se croisant dans tous les sens. C'est ainsi que l'oxyde d'étain se trouve en veinules entrelacées dans des masses de granit ou de porphyre, qui forment des amas distincts au milieu de la roche encaissante à Carclaze dans le Cornwall, à Geyer, à Zinnwald et à Altenberg, en Saxe et en Bohême. Le fer oxydulé se rencontre en veinules dans des amas de serpentine, ou de roches talqueuses.

Les *mines en sac* sont des amas de minerais remplissant des cavités superficielles ou des crevasses, qui se rencontrent principalement dans les terrains calcaires. Beaucoup de minerais de fer sont exploités dans des gisements de ce genre; ils constituent plusieurs des gîtes que la législation française sur les mines qualifie de *minières*.

Les *amas couchés* ou *bancs*, sont des masses intercalées dans les

terrains stratifiés, et ne différant guère des véritables couches que par leur étendue bornée. Celle-ci est cependant généralement suffisante pour qu'on puisse les exploiter comme de véritables couches.

L'on donne le nom de *veines* à des lits minces peu étendus, intercalés dans des terrains stratifiés.

Enfin on a encore des *amas droits*, ou masses droites, *stehende stocke*, qui paraissent être des filons très-épais, ou des parties renflées de filons. On a remarqué que ces filons très-puissants existent principalement à la jonction de deux terrains, dont l'un est stratifié et l'autre ne l'est pas, et qu'ils sont intercalés parallèlement aux couches du terrain stratifié. Aussi quelques auteurs leur ont donné le nom de *filons en couches*. Ils se distinguent des couches par leur structure : d'ailleurs le parallélisme à la stratification n'est presque jamais complet; et la plupart du temps, ils coupent les couches dans une partie de leur étendue.

Mode de gisement des principales substances minérales. — Nous terminerons ces notions préliminaires par l'indication du mode habituel de gisement des substances minérales qui sont l'objet des exploitations les plus nombreuses et les plus importantes.

On rencontre en couches :

Les ardoises, les grès, les marnes, la plupart des calcaires exploités comme moellons, pierres de taille ou pierres à chaux, les calcaires argileux pour la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments, le gypse, le sel gemme : peut-être ces deux dernières substances ne constituent-elles pas, du moins ordinairement, de véritables couches, mais des amas couchés d'une étendue moindre que celle du terrain dont ils font partie; néanmoins, cette étendue est assez grande pour que ces amas ne se distinguent pas des véritables couches, sous le rapport du mode d'exploitation qui leur convient.

On rencontre encore en couches tous les combustibles minéraux, depuis les anthracites des terrains de transition, jusqu'aux dépôts superficiels de tourbe. Bien que les combustibles minéraux soient principalement abondants dans le terrain houiller proprement dit, il en existe cependant dans tous les terrains stratifiés, depuis les schistes et les calcaires de transition jusque dans les dépôts les plus récents.

Le combustible des terrains de transition est presque toujours de l'anthracite, c'est-à-dire une houille sèche, non flambante, très-riche en carbone et d'une combustion difficile. Tels sont les combustibles exploités à Sablé, et sur d'autres points des départements de la Sarthe et de la Mayenne, ceux du sud de l'Irlande, etc.

Dans le terrain houiller proprement dit, les couches d'anthracite

sont plus rares : la houille y est le plus ordinairement bitumineuse et flambante, mais de qualité variable, dans les différentes couches d'un même terrain, et souvent aussi dans l'étendue d'une même couche.

Les combustibles se rencontrent beaucoup plus rarement dans les terrains stratifiés supérieurs au terrain houiller. Cependant on trouve encore des traces de houille et même d'anthracite dans les marnes irisées, le calcaire jurassique et jusque dans la craie. Ainsi on exploite de la houille dans les marnes irisées, à Gemonval et dans d'autres localités du département de la Haute-Saône. Les couches de houille des environs de Milhau (Aveyron), les gîtes d'anthracite des environs de la Mure (Isère), ceux de Brora, en Écosse, appartiennent au calcaire jurassique ; enfin les gîtes de combustibles d'Entrevernes dans les Alpes, de Tonnau en Savoie, qui ont, en grande partie au moins, les caractères de la houille, appartiennent au groupe des terrains crétacés.

Les gîtes de lignites, bien qu'il s'en trouve déjà dans les terrains crétacés et même jusque dans les marnes irisées, abondent surtout dans les terrains tertiaires et les terrains de sédiment encore plus modernes. Tels sont les lignites du Soissonnais, dans les assises inférieures du terrain de Paris, les lignites contenus dans la molasse, en Provence, dans le bas Languedoc et en Suisse, ceux qui se trouvent dans un terrain de sédiment plus récent encore que la molasse, près de Latour-du-Pin (Isère), etc.

Enfin cette série de combustibles minéraux se termine aux dépôts de tourbe recouverts seulement par une faible épaisseur de terre végétale, aux forêts sous-marines que l'on aperçoit à marée basse sur les bords de la mer, en plusieurs endroits, et notamment sur les côtes de France et d'Angleterre, et aux dépôts de végétaux qui sont encore entraînés aujourd'hui par quelques grands fleuves, tels que le Mississipi, et s'ammoncèlent à leur embouchure.

Parmi les minerais métalliques, les minerais de fer sont souvent en couches. Ainsi on a, dans le terrain houiller, des couches de fer carbonaté lithoïde, en masses continues, comme dans les environs d'Aubin (Aveyron), ou en rognons isolés et séparés les uns des autres par des argiles. Le minerai de fer oxydé hydraté se trouve fréquemment en couches parfaitement caractérisées dans les divers étages du terrain jurassique : je citerai comme exemples les gîtes de Mondalazac (Aveyron), de Couches (Saône-et-Loire), de Châtillon-sur-Seine (Côte-d'or), de la Voûte (Ardèche), et ceux des environs d'Aalen et de Wasseralfingen dans le Wurtemberg.

Les minerais de fer en grains paraissent encore constituer de véritables couches dans les assises inférieures du terrain crétacé, le grès vert et l'argile Wealdienne.

Les autres minerais métalliques se rencontrent beaucoup plus fréquemment en filons ou en amas qu'en couches. Cependant les gîtes de cuivre pyriteux de Mansfeld et de la Turinge sont des couches bien caractérisées dans le terrain pénéen. On doit aussi rapporter aux gisements en couches, les assises de grès contenant de petits nodules de galène, exploitées au Bleyberg près de Cologne, et qui sont rapportées par la plupart des géologues au terrain de grès bigarré. Le gîte de plomb de Védrin près Namur, dans le terrain de transition, les gîtes de plomb sulfuré et de calamine dans les environs de Tarnowitz en Silésie, sont en couches dans un terrain calcaire. Le mercure sulfnré est en couches dans la Bavière rhénane, près Cousel et Obermoschel.

On trouve aussi sur plusieurs points de la France, de la galène disséminée dans des couches de grès qui appartiennent au terrain jurassique (grès du lias). L'oxyde d'étain en morceaux roulés se trouve concentré dans quelques-unes des couches de certains dépôts d'alluvion, qui ont comblé des vallées basses, dans le voisinage de gîtes d'étain en filons.

Tous les minerais métalliques se trouvent en filons ou en amas. La plupart des minerais de fer exploités dans le sud-ouest de la France, dans les départements de la Dordogne, du Lot, de Lot-et-Garonne, etc., ceux des départements de l'Indre et du Cher, etc., constituent des amas superficiels de forme irrégulière qui paraissent remplir les cavités des terrains calcaires qui les renferment. Les minerais de fer de Rancié, de Fillols, etc., et tous les gîtes exploités en France au pied de la chaîne des Pyrénées forment des amas de forme irrégulière, plus ou moins étendus, dans des terrains stratifiés composés principalement de calcaire; tous se trouvent dans le voisinage de la ligne de séparation des terrains stratifiés et des terrains inférieurs non stratifiés.

L'on a d'ailleurs de nombreux exemples de gîtes métallifères soit en filons caractérisés, soit en amas, dans des positions semblables, de sorte que beaucoup de géologues sont disposés à croire que l'apparition des roches cristallines, dont l'origine plutonique est généralement admise, telles que les granites, les porphyres, les roches trappéennes, a joué un rôle important dans la formation de ces dépôts. (Voyez ***Études sur les dépôts métallifères***, par M. J. Fournet.)

Beaucoup de substances non métalliques se rencontrent aussi en amas. Le gypse et le sel gemme se trouvent en amas dans le calcaire jurassique, dans les marnes irisées, etc. Les kaolins ou terres à porcelaine exploitées dans le département de la Haute-Vienne, près de Saint-Yrieix, et dans le comté de Cornwall, près Saint-Austle, forment des amas dans le granite.

Les minéraux que l'on rencontre en amas entrelacés ou stockwerks, sont principalement l'oxyde d'étain en veinules dans des roches de granite ou de porphyre; le fer oxydulé en veinules dans des masses de serpentine, de roches talqueuses ou amphiboliques; le cuivre pyriteux dans des schistes argileux, des roches talqueuses, amphyboliques ou trappéennes.

Enfin on trouve de l'or, des minerais de platine, de l'oxyde d'étain, disséminés dans des sables superficiels, ou dans des couches de sable et de gravier situées à une petite profondeur, d'où on les extrait par l'opération du lavage. Ces sortes de gisements sont appelées en allemand *seiffenwerk*, en anglais *streamwork*. Tels sont les minerais d'or et de platine de la Sybérie, au pied des monts Ourals et des monts Altaï. Les sables de plusieurs rivières contiennent des paillettes d'or; le Rhône, la Garonne, l'Ariége, la Cèze sont dans ce cas. Les diamants et beaucoup de gemmes se trouvent également disséminés dans des sables superficiels.

CHAPITRE II.

RECHERCHE DES MINES.

Indices de l'existence de gîtes. — La découverte des mines est due le plus habituellement à des indices extérieurs que le hasard fait apercevoir. Ces indices consistent dans des affleurements du gîte, des fragments accidentellement détachés de ces affleurements, qui peuvent conduire à la recherche et à la découverte de ceux-ci, ou des émanations du gîte qui arrivent à la surface par les fissures des terrains supérieurs. Il n'y a guère que le *terrain houiller* proprement dit, dans lequel les gîtes de combustibles soient assez fréquents, pour que son existence seule bien constatée puisse être un motif suffisant d'y entreprendre des recherches suivies. Ce terrain est caractérisé par sa position géologique dans la série des terrains, par la nature des roches qui le composent, et qui consistent en assises de grès, d'argiles schisteuses et de houille, interstratifiées sans ordre périodique régulier, et par la nature des empreintes végétales très-nombreuses qui s'y rencontrent. Celles-ci suffiraient, dans le cas où les caractères de position géologique viendraient à manquer, pour le distinguer de plusieurs autres terrains composés, comme lui, d'assises de grès et de schistes, mais qui contiennent des végétaux fossiles d'espèces différentes.

Il ne sera pas inutile de dire ici que les observations multipliées des hommes éminents qui, dans ces derniers temps, ont fait faire de grands progrès à la géologie, ont montré que les gîtes métallifères ne se trouvent pas exclusivement dans les terrains de transition ou les terrains secondaires les plus anciens, comme on le croyait autrefois, mais qu'il en existe jusque dans les terrains les plus modernes. Nous répéterons ce qui a été rapporté dans le chapitre précédent au sujet de la fréquence des dépôts métalliques, près des points où les roches d'origines différentes sont en contact. Mais ces faits généraux sont loin de pouvoir guider le mineur dans des travaux de recherche spéciaux. Lorsqu'un gîte est une fois découvert, c'est à l'étude attentive de la contrée environnante, des dislocations que le terrain a subies, aux analogies avec les gîtes analogues existants dans les environs, s'il y en a de tels, que le mineur doit recourir, pour éclairer ses recherches ultérieures.

Les sources qui contiennent en dissolution du muriate de soude, sont habituellement un indice de l'existence de bancs de sel gemme dans le voisinage. C'est à des sources de ce genre, qu'est due la découverte du sel dans les départements de la Meurthe et de la Haute-Saône, dans le grand-duché de Bade, le Wurtemberg, etc. Cependant certaines sources salées paraissent tirer leur salure d'amas situés à de grandes distances. Telles sont celles qui alimentent les salines de Kreutznach, près de Bingen ; elles sortent d'une roche de porphyre et sont analogues aux sources thermales.

Les sources de naphte et d'asphalte sont des indices de l'existence de gisements de ces substances. On a dit que celles qui existent dans l'Ohio et le Kentuky, sont en relation avec des couches de houille. Aucune corrélation de ce genre n'a été signalée, à ma connaissance, dans les terrains houillers de l'Europe, où les sources de naphte émanent de dépôts de combustibles plus récents que la houille. On rencontre aussi des émanations gazeuses, principalement de gaz acide carbonique, d'hydrogène protocarboné, et d'hydrogène sulfuré. Les émanations d'acide carbonique et d'hydrogène sulfuré arrivent au jour dans le voisinage d'eaux minérales, qui contiennent ces gaz en dissolution et ne paraissent en connexion avec aucun gîte exploitable. Le gaz hydrogène protocarboné pur ou mélangé de gaz oléfiant, se dégage assez fréquemment par des fissures qui communiquent avec des couches de houille, d'où il émane. Mais les jets les plus abondants de ce gaz proviennent de terrains contenant du naphte, de l'asphalte, ou des gîtes de sel gemme. Dans le territoire des environs de Bakou, sur les bords de la mer Caspienne, qui est fortement imprégné de naphte, il suffit de creuser un trou en terre, pour que le gaz en sorte aussitôt et s'enflamme à l'approche d'une torche. Un sondage, exécuté en 1838 par M. Degousée, à Schwabweiler (Bas-Rhin), a atteint à la profondeur de 20m,66, une couche d'argile sableuse imprégnée de pétrole, qui arrivait à la surface avec les eaux ascendantes; cette découverte fut accompagnée d'un dégagement abondant d'hydrogène protocarboné. D'un autre côté, des forages exécutés en Chine dans des terrains contenant des gîtes de sel gemme, ont donné naissance à des jets de gaz inflammable qui sont utilisés, dans ce pays, pour l'évaporation des eaux salées; l'on a aussi signalé des émanations de ce gaz, dans plusieurs mines de sel de l'Europe, notamment dans celle de Bex en Suisse, de Gottesgabe, à Reine comté de Tecklenberg, de Wielickzka en Pologne, etc.

Les recherches des mineurs ont le plus souvent pour objet, des gîtes analogues à ceux qui sont déjà connus et exploités dans une cou-

trée, ou le prolongement de gîtes connus, à des distances plus ou moins considérables, et au delà d'accidents qui les ont interrompus. Les recherches de ce dernier genre se font le plus ordinairement par des travaux souterrains qui se rattachent aux travaux existants. On peut faire usage de la sonde, lorsqu'il s'agit de retrouver le prolongement de gisements en couches, à des distances assez grandes des points où ils sont reconnus.

Enfin on peut aussi qualifier de travaux de recherche, ceux qui sont entrepris dans le but d'arriver à la reprise d'anciennes mines abandonnées, dont les plans sont perdus, et sur lesquelles on ne possède que des renseignements vagues, fournis par la tradition, ou par la nature des déblais retirés des anciennes exploitations, et abandonnés sur les haldes.

Recherches entreprises sur des indices extérieurs — Nous nous occuperons d'abord des recherches entreprises sur de simples indices extérieurs. Si ces indices consistent en fragments détachés des affleurements, on tâchera d'abord de retrouver ceux-ci. Pour y parvenir, on examinera avec soin l'aspect que présentent les fragments, leur composition, le lieu où ils ont été trouvés. L'aspect et la nature des fragments feront reconnaître en général s'ils proviennent d'un filon ou d'une couche. Si ces fragments sont tendres, si leurs angles ne sont point émoussés, on en conclura naturellement que les affleurements sont peu éloignés. Si les fragments sont durs, arrondis, et à arêtes émoussées, on en conclura qu'ils ont été roulés, qu'ils peuvent venir d'une grande distance, et que les matières dont ils sont composés ont pu être associées dans l'origine à des matières plus tendres qui auraient été détruites, ou détachées pendant le transport. Dans ce dernier cas, la configuration du sol pourra indiquer de quel côté viennent les fragments et quelles causes les ont entraînés ; on remontera les vallées, les cours d'eau aboutissant au lieu de la découverte ; on interrogera les escarpements, les flancs des vallées, etc.

Il faut savoir distinguer des fragments détachés et entraînés par les causes mécaniques actuellement agissantes à la surface du globe, de ceux qui auraient été déposés par les causes, beaucoup plus puissantes, qui ont agi antérieurement à la période actuelle. C'est ainsi que l'on rencontre sur beaucoup de points, dans les départements du Lot, du Cantal et de l'Aveyron, des minerais de fer oxydé hydraté, à gangue de quartz, épars dans les champs, tout à fait à la surface du sol. Ils sont quelquefois si abondants, qu'on est tenté de croire qu'ils ont été détachés par la charrue de la roche inférieure à la terre végétale. Cependant cette roche n'en contient aucune trace, et les *mines en sac*

où se trouvent les dépôts exploitables de minerais analogues, sont souvent situées à de grandes distances des champs où sont les minerais épars. De même des morceaux roulés d'étain oxydé que l'on rencontre à la surface, peuvent être des indices de dépôts d'étain d'alluvion, comme aussi ils peuvent être isolés et éloignés de tout gisement exploitable, à la manière des minerais de fer dont nous venons de parler.

Recherches sur les affleurements. — Quand on sera parvenu à remonter des fragments isolés à l'affleurement du gîte auquel ils ont appartenu, on devra s'attacher à poursuivre cet affleurement, et on explorera le gîte par des travaux peu dispendieux. On s'assurera d'abord s'il appartient à une couche, à un filon régulier, ou à un amas. S'il s'agit d'un dépôt de combustible, houille, anthracite ou lignite, le gîte sera en couche : on déterminera d'abord sa direction, qui sera celle des couches du terrain stratifié dont il fait partie. Dans les pays de montagnes, il sera très-rare qu'on ne puisse pas découvrir facilement plusieurs points de l'affleurement assez distants les uns des autres. Dans les pays de plaine, et en général quand les roches seront partout cachées par des dépôts plus modernes, ou de la terre végétale, on reconnaîtra approximativement la direction et l'inclinaison, au moyen d'une tranchée à ciel ouvert exécutée au point où l'affleurement est connu, et peut-être commencera-t-on à approfondir une galerie inclinée suivant la pente du gîte, entre son toit et son mur. On jalonnera à peu près la direction de la couche à la surface et on cherchera à découvrir d'autres points de l'affleurement, en creusant de distance en distance des tranchées transversales à la direction approximative. En chacun des points, où l'affleurement aura été retrouvé, on pourra exécuter des galeries inclinées suivant la pente, pour explorer le gîte près de la surface. S'il s'agit d'un gîte métallifère, on cherchera de même à s'assurer s'il constitue un filon régulier. Si l'affleurement n'est pas découvert sur plusieurs points, des fouilles peu profondes à l'endroit de la découverte serviront à faire connaître sa direction et son inclinaison approchées, et la nature des substances qu'il renferme. Si c'est un filon bien caractérisé, parce qu'il coupe les assises du terrain qui le renferme, parce qu'il a des salbandes, et qu'il est nettement séparé des épontes, parce qu'il présente cette structure symétrique, à partir du toit et du mur, que l'on remarque dans beaucoup de filons, on se comportera comme dans le cas d'une couche; et il pourra être convenable de chercher à découvrir plusieurs points de l'affleurement au moyen de tranchées superficielles, assez distantes les unes des autres, et dont

l'axe sera perpendiculaire à la direction approchée reconnue par les premières fouilles.

Si les premières fouilles donnent lieu de croire que l'on a affaire à un amas, où si les tranchées entreprises à quelque distance prouvent que le gîte ne se poursuit pas en ligne à peu près droite, on concentrera les travaux sur un même point, en s'attachant à reconnaître de tout côté les parois du gîte.

Quand les affleurements nouveaux sont découverts dans une contrée où il existe déjà des exploitations sur des gîtes analogues, on ne devra pas perdre de vue la règle à peu près générale du parallélisme entre les gîtes d'une même nature. Quant aux couches, ce parallélisme est presque rigoureux; mais comme les couches sont fréquemment contournées, un affleurement peut très-bien dépendre d'un gîte déjà connu et exploité ailleurs, bien que l'inclinaison et même la direction soient différentes. Quant aux filons, le parallélisme des gîtes de même nature est également, sinon tout à fait général, du moins sujet à des exceptions assez rares, ou à des écarts peu étendus.

Altérations des affleurements. — Généralement, un gîte ne présente pas sur ses affleurements, les mêmes caractères que dans la profondeur. Les matières y ont été altérées, tant dans leur aspect que dans leur qualité et même leur composition chimique, par l'influence de l'air et de l'eau. Cette altération pénètre d'ailleurs jusqu'à des profondeurs variables, suivant la nature des substances dont il s'agit et l'état d'agrégation des masses. Ainsi, pour la plupart des bancs de pierres employées dans les constructions, pour le gypse, les argiles, les minerais de fer hydraté, l'altération est nulle ou limitée à une profondeur de quelques décimètres. Pour les dépôts de combustibles, elle pénètre un peu plus profondément, mais s'étend rarement au delà de 10 à 12 mètres; souvent même le combustible est d'aussi bonne qualité et aussi pur à 2 ou 3 mètres de la surface que dans le reste du gîte Pour la plupart des filons et des gîtes métallifères, l'altération est plus prononcée et a pénétré plus loin. Beaucoup d'entre eux contiennent sur les affleurements de l'hydrate d'oxyde de fer mêlé à du quartz; c'est ce que les mineurs allemands appellent le *chapeau de fer* des filons. Les filons métalliques du comté de Cornwall présentent aussi sur leur crête de grandes masses de fer hydraté, que les mineurs du pays nomment *gossan*. On remarque, dans cette même contrée, que beaucoup de filons qui ont été exploités comme mines d'étain près de la surface, le sont aujourd'hui, à de grandes profondeurs, comme mines de cuivre, de sorte que l'oxide d'étain paraît s'être concentré

dans le voisinage du jour, et la pyrite de cuivre dans la profondeur. Au surplus, il est évident que l'on ne doit point s'attendre à trouver à la surface des substances décomposables par l'action de l'air et de l'humidité. Ainsi, des protocarbonates et des sulfures pourront avoir été transformés en peroxydes ou en sulfates, et si ces derniers sont solubles, ils auront pu être entraînés par les eaux pluviales.

Variations de richesse des filons. — C'est ici le lieu de rappeler que la richesse des filons est la plus grande, tantôt dans les parties voisines de la surface, tantôt dans la profondeur, tantôt dans les parties intermédiaires, et que le plus ou moins de richesse semble lié, dans beaucoup de cas, à la nature des roches qui constituent les parois. Ainsi les filons des environs de Joachimsthal, en Bohême, ont été beaucoup plus riches dans les parties voisines de la surface, qui ont été exploitées dans le commencement du XVI[e] siècle, qu'elles ne le sont actuellement que l'on est arrivé à une grande profondeur. Les filons de la Hongrie ont leur plus grande richesse dans une zone intermédiaire entre 80 et 150 toises au dessous du sol. Les filons de pyrite cuivreuse du comté de Cornwall paraissent au contraire s'enrichir à mesure que la profondeur augmente. Les filons de Cumberland, du Derbyshire, ceux de Kongsberg en Norwége, etc., sont beaucoup plus riches dans les parties où ils traversent certains bancs du terrain dans lequel ils sont encaissés. Il résulte de ces faits, que les variations de richesse des filons ne sont soumises à aucune règle générale, mais que dans une contrée donnée, tous les filons de même nature, qui sont à peu près parallèles, sont aussi sujets aux mêmes variations de richesse, dans les mêmes circonstances. Ainsi on pourra prévoir, avec un grand degré de probabilité, par ce qui est arrivé dans certains gîtes exploités anciennement dans un pays, ce qui arrivera pour des gîtes nouveaux du même *système* qui pourraient y être découverts.

Utilité de ne commencer l'exploitation qu'à la suite de travaux de recherche suffisamment étendus. — Si les premières fouilles entreprises sur les affleurements donnent lieu de penser que le gîte peut être exploité avec avantage, il est essentiel de s'attacher, dès le principe, avant d'entreprendre des travaux plus dispendieux, à bien reconnaître sa forme et son *allure*. Ainsi il ne suffira pas de savoir que c'est une couche ou un filon; il faudra encore reconnaître sa puissance, interroger la nature du toit et du mur, s'assurer que l'on n'a point pris pour parois encaissantes, de simples *nerfs* ou *lits* de roches stériles intercalés. Enfin, il faut reconnaître les inflexions du gîte. Le meilleur mode d'exploration consiste à combiner une ou deux galeries

horizontales exécutées sur le mur même du gîte, avec des galeries montantes ou descendantes sur le mur, suivant la ligne de plus grande pente, et quelques galeries transversales, allant du mur sur lequel on est appuyé, au toit, dans le cas où le gîte a une puissance supérieure à la largeur des galeries. Ce n'est qu'après des travaux de reconnaissance suffisants pour donner une idée nette de la forme du gîte, sur une assez grande étendue, que l'on peut arrêter le système de travaux par lesquels on devra l'atteindre et l'exploiter à des profondeurs plus ou moins considérables, décider s'il convient de le rattacher à des gîtes déjà exploités dans les environs, ou de l'attaquer par des travaux indépendants, enfin déterminer un mode approprié d'exploitation.

On ne saurait trop recommander à ceux qui dirigent des mines, de ne pas se presser d'établir des chantiers d'exploitation au milieu d'un gîte dont la forme leur est encore inconnue, de s'abstenir surtout, d'y ouvrir des galeries à différents niveaux ou étages. Il serait principalement dangereux d'agir ainsi dans les gîtes d'une grande puissance, dont l'exploitation ultérieure peut être rendue extrêmement difficile et coûteuse par suite de premiers travaux mal disposés.

En général, les fouilles entreprises sur les affleurements, et qui sont poussées d'ailleurs jusqu'à une profondeur variable, suivant les apparences de richesse, et les difficultés qui accompagnent ces travaux, suffisent, quand elles sont dirigées avec intelligence, pour que l'on puisse se décider sur la marche à suivre ultérieurement, et sur l'emplacement le plus convenable des orifices qui mettront le gîte, à une profondeur plus ou moins grande, en communication avec la surface. Il est très-rare que l'on ait recours à des sondages pour l'exploration des profondeurs, quand les affleurements sont à découvert : il n'est avantageux de le faire que dans des circonstances exceptionnelles qui seront indiquées plus loin.

Dans quels cas il convient d'avoir recours au sondage. — Quand un gîte n'a point d'affleurements et que son existence en couches dans un terrain stratifié est rendue probable par des émanations d'eaux chargées de matières salines en dissolution, ou de certains gaz, la méthode de recherche la moins dispendieuse consiste ordinairement dans des sondages ou forages, qui font connaître la nature des assises dont le terrain se compose suivant une ligne verticale. Le sondage s'applique surtout avec avantage à la recherche des substances liquides ou solubles dans l'eau, telles que les eaux douces ou salées, et le sel gemme, parce que les premières arrivent à la surface par le trou de sonde lui-même, et parce que les secondes peuvent être exploitées par

dissolution, sans qu'on soit obligé de mettre le gîte en communication avec la surface par d'autres travaux que les trous de sonde eux-mêmes. Nous consacrerons un article spécial à la description des outils employés pour forer le terrain à toute profondeur, et de la manœuvre de ces outils.

Recherches par galeries perpendiculaires aux gîtes. — Le parallélisme habituel des gîtes analogues dans une contrée donnée, et l'existence fréquente de filons latéraux, sont des motifs qui doivent engager à pratiquer des galeries transversales perpendiculaires à la direction du gîte exploité. On doit d'abord, toutes choses égales d'ailleurs, préférer la direction transversale à celle qui est parallèle aux gîtes, pour les travaux nécessaires à une exploitation existante, tels que les galeries d'écoulement, afin que ces travaux puissent conduire à la découverte de gîtes parallèles, s'il en existe de semblables. Dans le cas général, il sera bon d'explorer de loin en loin les épontes des filons; on profitera pour cela des veines détachées accidentellement du filon principal, que l'on suivra par des galeries qui pourront être prolongées, comme travaux de recherche, au delà des points où elles cessent d'être productives.

Recherche des gîtes interrompus. — Le mineur a souvent à rechercher la continuation d'un gîte interrompu accidentellement par un brouillage, un amincissement, une faille ou filon croiseur. Quant aux brouillages et aux amincissements, il est impossible de poser des règles précises. Les accidents de ce genre ont généralement une étendue fort restreinte; l'on doit s'attacher à suivre les traces du gîte, qui sont rarement tout à fait effacées. Quand elles disparaissent complètement, il faut examiner si la suppression du gîte exploité a lieu par simple rapprochement du toit et du mur; dans ce cas, on suivra, par une galerie, la limite de l'amincissement; il pourra arriver que l'on rencontre un point où le gîte exploité se continue, sinon avec toute sa puissance, du moins avec une épaisseur notable, et qu'en suivant ainsi la limite de l'accident, on parvienne à le contourner. Si le *barrage* a une étendue considérable, si le gîte est interrompu partout, et si néanmoins le toit demeure nettement distinct du mur, on cheminera dans le plan de séparation du toit et du mur par une galerie qui entaillera l'un et l'autre, ou l'un d'eux seulement, en s'appuyant sur l'autre, suivant une direction perpendiculaire à la ligne du *barrage*. Le cas le plus embarrassant est celui où le toit et le mur cessent d'être distincts, et où par conséquent toute trace du gîte et même de la place qu'il occupait, est effacée. Dans cette circonstance, on examinera de plus près, si ce que l'on a pris d'abord pour un amincissement ne

serait pas plutôt une fissure, une fente accompagnée d'un glissement du terrain. S'il en était ainsi, on devrait se conduire comme nous l'expliquerons plus loin. L'existence d'une fissure avec glissement ou chute du terrain est généralement facile à reconnaître, quand le gîte est une couche ou un filon encaissé dans un terrain stratifié, composé d'assises différentes, et dont les caractères sont tranchés. La nature des couches que l'on rencontre en arrière de l'accident suffit alors pour montrer s'il y a eu glissement ou non, et même dans le premier cas, quand la succession des couches dont le terrain se compose est connue d'avance, pour indiquer dans quel sens a eu lieu le déplacement relatif des deux parties du terrain séparées par la fissure. Mais si le gîte est un filon encaissé dans un terrain non stratifié, ou qui, bien que stratifié, est composé d'une succession de couches qui ne se distinguent pas les unes des autres par des caractères tranchés, on n'aura plus aucun moyen indirect de reconnaître l'existence de la fissure; il faudra donc suivre avec persévérance les limites du barrage, examiner les circonstances les plus minutieuses de l'accident, pour retrouver les traces du gîte que l'on suivait, ou constater l'existence d'une fente. Il serait d'ailleurs possible que l'accident rencontré fût la limite réelle du gîte, surtout si ce gîte est du genre des amas, qui sont souvent circonscrits de toute part entre des limites assez peu étendues.

Rejets des filons et couches. — Un accident très-fréquent consiste dans l'interruption du gîte exploité par une faille ou filon croiseur, ou par une simple fissure accompagnée d'un *rejet*. Le rejet n'est autre chose que le résultat de la dislocation du terrain, du déplacement relatif des deux *masses* qui sont séparées par la fissure, faille ou filon croiseur, l'une par rapport à l'autre. Or ce déplacement produit en général un rejet apparent tout à la fois, dans le sens horizontal et dans le sens vertical. On doit concevoir que lorsque la fente remplie par la matière du croiseur ou de la faille s'est formée, le gîte interrompu existait déjà. Par suite de la dislocation qui a eu lieu, le prolongement de ce gîte a été transporté ailleurs; mais comme il a la forme d'un plan indéfini, du moins si c'est une couche ou un filon, il s'ensuit qu'il peut être retrouvé en cheminant au delà de la faille, dans une direction quelconque, pourvu qu'elle ne soit pas parallèle au plan du gîte déplacé; il sera seulement nécessaire de connaître le sens du déplacement relatif qui a eu lieu, afin de déterminer le sens dans lequel on devra marcher, pour rencontrer le gîte, dont on s'éloignerait de plus en plus, en marchant en sens inverse.

Recherche d'une couche au delà d'une faille. Sens du rejet. —

Le sens dans lequel on doit marcher, peut être determiné d'une manière certaine, lorsque le gîte exploité est encaissé dans un terrain stratifié, composé de couches distinctes les unes des autres, et que d'ailleurs on connaît bien l'ordre de superposition des couches.

Soit, par exemple, un terrain stratifié à couches inclinées, dont la *fig.* 1, *Pl. II*, est une section verticale par un plan perpendiculaire à la direction, et dans lequel on exploite une couche a; supposons que l'on connaisse la nature des couches successives qui se trouvent au toit et au mur de la couche exploitée, et qui peuvent différer entre elles par leur nature, leur structure, ou même simplement, par leur épaisseur. Si, en exécutant dans la couche a la galerie horizontale AB (*fig.* 2, *Pl. II*) on rencontre une faille FG, on traversera d'abord cette faille d'outre en outre, en prolongeant la galerie AB à travers les matières dont elle est remplie. On reconnaîtra en même temps sa direction et son inclinaison. Je suppose que FG soit sa direction, et que son inclinaison soit dans le sens indiqué par la flèche zv, tandis que l'inclinaison des couches est dans le sens indiqué par la flèche xy. Les lettres N, E, S, O indiquent les directions des quatre points cardinaux sur les deux figures 1 et 2. Si, après avoir traversé la faille et avoir mis son mur à découvert en B', on reconnaît distinctement que la couche qui se trouve en B' derrière cette faille est la même, par exemple, que la couche b'', l'une de celles qui se trouvent dans la région du mur de la couche a, on en conclura que le déplacement relatif du terrain situé au mur de la faille a eu lieu vers l'est, pourvu toutefois que l'inclinaison des plans de stratification n'ait pas changé ou n'ait changé que d'une faible quantité, d'un côté de la faille à l'autre. (La direction et l'inclinaison restent en effet généralement à peu près les mêmes.) Il s'ensuit que la couche rejetée, sera rencontrée par une galerie quelconque, poussée derrière la faille, à l'est du prolongement fictif de la couche, tandis qu'au contraire les galeries poussées à l'ouest de ce prolongement s'en écarteraient de plus en plus. On pourra même, d'après les épaisseurs des couches que l'on suppose connues, fixer approximativement la position de la trace du mur de la couche rejetée sur le plan horizontal, au delà de la faille. Soit mn (*fig.* 2) cette trace ainsi déterminée approximativement.

Parmi toutes les galeries par lesquelles on peut rejoindre la couche, la plus courte est une galerie inclinée partant du point B', et dont l'axe est perpendiculaire au plan de la couche rejetée, pourvu toutefois que cette galerie demeure derrière le mur de la faille. Voici comment on s'assurera si cette dernière condition est remplie. L'axe d'une

galerie perpendiculaire au plan de la couche sera projeté horizontalement, suivant la ligne B'S, menée par le point B' perpendiculairement à la trace horizontale *mn* du plan du mur de la couche rejetée. On aura pu vérifier si la direction des couches est restée au delà, la même qu'en deçà de la faille, ou si elle a varié, et par conséquent on aura la direction exacte à laquelle la ligne B'S doit être perpendiculaire. On aura pu également mesurer l'angle d'inclinaison des couches, au delà de la faille. Cela posé, il est clair que l'axe de la galerie projetée est un des côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle dont l'hypoténuse est B'S, et dont l'angle en S est égal à l'inclinaison du plan de la couche rejetée sur l'horizon, le point S étant pris sur la trace horizontale présumée *mn* du mur de la couche. Si donc on trace une droite indéfinie SI faisant avec B'S un angle égal à l'inclinaison de la couche rejetée, et si l'on mène B'R perpendiculaire à SI, le triangle B'SR sera le triangle, dont nous venons de parler, rabattu sur le plan horizontal. Si ensuite on mène RC perpendiculaire à B'S, le point C sera la projection horizontale du point de rencontre de l'axe de la galerie et du mur de la couche, au delà de la faille. Pour savoir si ce point est au mur de la faille, il suffira de déterminer la projection horizontale de l'intersection commune du plan de la faille et du plan de la couche rejetée. Il faudra pour cela avoir mesuré les angles d'inclinaison de la faille et de la couche. Je suppose que α, β (*fig.* 3 et 4, *Pl. II*), soient ces angles respectifs. Le point *m* appartenant déjà à la projection horizontale cherchée, il suffit d'en déterminer un second. Or si l'on conçoit que les deux plans de la faille et de la couche soient coupés par un même plan horizontal situé à une distance arbitraire HK = H'K' (*fig.* 3 et 4) au-dessus du plan de projection, les traces du plan coupant et des deux plans de la faille et de la couche seront projetées suivant des lignes respectivement parallèles aux traces *m*K, *mn*, et dont les distances à ces traces seront égales aux lignes KP, K'P' (*fig.* 3 et 4) que l'on détermine en élevant deux perpendiculaires égales HK et H'K' sur l'un des côtés de chacun des angles α et β, et menant les parallèles KP, K'P' au même côté. Portant donc ces longueurs KP, K'P', sur des perpendiculaires respectives aux traces *m*K, *mn* (*fig.* 2), et menant les parallèles OX, OY, le point O où ces parallèles se rencontrent sera un second point de la projection cherchée. Cette projection sera donc la droite indéfinie DD' qui passe par les points *m* et O. Tous les points de la couche rejetée situés derrière la faille se projetteront horizontalement dans l'espace embrassé par les deux angles D*mn*, D'*mn* tandis que les points de la couche, avant le rejet, se projetteront de l'autre côté de la ligne D.D.'

Digitized by Google

menée par le point B, parallèlement à DD'. La bande comprise entre DD' et D_1D_1' sera, dans le cas où la direction des couches n'a pas varié, le vide que la dislocation du terrain laisse dans la projection horizontale du gîte. En conséquence, si le point C déterminé ainsi que nous l'avons dit tombe en dehors de l'espace compris entre ces parallèles, la galerie de plus courte distance pourra être exécutée; si au contraire le point C tombe entre ces parallèles, comme cela a lieu dans la figure 2, cette galerie rentrerait dans la faille, et ne rencontrerait pas le gîte. Dans ce dernier cas, le plus court chemin pour aller retrouver la couche, en partant du point B' est une galerie inclinée, exécutée dans la faille même, appuyée sur son mur, et dirigée perpendiculairement à l'intersection commune du plan de ce mur et du plan du gîte, laquelle est projetée horizontalement suivant DD'. Pour trouver la longueur de cette galerie, concevons que le plan de la faille soit rabattu sur le plan horizontal de projection, en tournant autour de sa trace B'*m*. Il sera facile de trouver la position qu'occupera dans le rabattement, l'intersection commune projetée en DD'. Menant en effet O*k* perpendiculaire à B'*m*, et portant sur le prolongement de O*k* une longueur *hk* égale à HP, joignant le point *m* au point *h*, la ligne *mh* sera le rabattement de l'intersection commune. La ligne B'R' perpendiculaire à *mh* sera la longueur cherchée, et l'angle R'B'*m* sera celui que la direction de l'axe de la galerie formera avec la trace horizontale de la faille. Cela suffira pour fixer sa position, et donner au mineur les indications nécessaires pour son exécution, puisqu'elle doit d'ailleurs demeurer appuyée sur le mur de la faille.

Rapports de longueur des diverses galeries par lesquelles on peut rejoindre le gîte rejeté. — En général il est plus commode, pour la continuation des travaux d'exploitation, de rejoindre la couche interrompue, par une galerie horizontale que par une galerie inclinée à l'horizon. Une galerie de jonction horizontale est possible toutes les fois que les couches rejetées ne sont point elles-mêmes horizontales. Elle peut être exécutée, soit dans la faille même, soit derrière la faille, et à travers les couches, ou, suivant l'expression des mineurs, ***à travers bancs***. Si l'on chemine à travers bancs, la meilleure direction sera évidemment celle qui sera perpendiculaire à la direction des couches; elle est indiquée dans la figure 2 par la ligne B'S, dont la longueur sera aussi celle de la galerie à exécuter. La plus courte distance du point B' à la couche étant la perpendiculaire au plan de la couche, dont B'R est la longueur, on voit que le rapport de B'S à cette plus courte distance est celui de l'unité au sinus de l'angle d'inclinaison de la couche, que nous avons désigné par ε. Ainsi *d* désignant la plus

courte distance, on a : $B'S = \frac{d}{\sin \epsilon}$.

La distance B'S augmente donc à mesure que l'angle ϵ diminue et devient infinie pour $\epsilon = 0$, c'est-à-dire quand la couche est horizontale.

Si l'on chemine horizontalement dans la faille même, il faudra suivre la ligne $B'm$ dont la longueur est toujours plus grande que B'S dans le rapport de l'unité au sinus de l'angle $B'mS$, que comprennent entre elles les traces horizontales de la faille et de la couche rejetée. Appelant y cet angle, on a $B'm = \frac{B'S}{\sin y} = \frac{d}{\sin \epsilon \sin y}$. $B'm$ augmente donc à mesure que l'angle y compris entre les directions de la faille et de la couche est plus petit. La galerie de jonction la plus courte ne sera pas toujours celle qu'il conviendra d'exécuter. La dureté et la solidité comparées des matières qui remplissent la faille et des roches qui constituent le terrain, l'utilité qu'il peut y avoir à explorer de préférence la faille, ou les couches voisines du gîte, la crainte d'amener dans les travaux des filtrations d'eaux qui se rencontrent fréquemment dans les failles, la facilité de raccorder entre elles les voies de roulage, telles sont les considérations principales d'après lesquelles on déterminera, dans chaque cas, la direction la plus avantageuse à donner à la galerie de jonction.

Recherche des filons rejetés. Règle de Schmidt. — Nous avons traité en premier lieu, de la recherche d'une couche interrompue par une faille, parce que la nature même du terrain qui se retrouve derrière la faille peut alors indiquer le sens du déplacement relatif des deux masses disjointes, et par conséquent la direction dans laquelle on doit pousser les recherches, et même la longueur du chemin à faire pour arriver. Néanmoins il peut se faire, même pour les failles qui traversent un terrain stratifié, que l'inspection des couches n'apprenne rien de positif, soit à cause de la similitude des couches existantes dans les régions du toit et du mur du gîte, soit parce que le terrain a subi une dislocation considérable, et que l'on ne connaît pas l'ordre de succession des couches jusqu'à cette distance. Enfin ces indices manquent toujours quand il s'agit de filons croiseurs qui interrompent des gîtes encaissés dans des terrains non stratifiés, ou composés de couches qu'il n'est pas possible de distinguer les unes des autres. Dans ce cas, l'observation montre que le plus souvent la dislocation du terrain a consisté principalement en un glissement du toit sur le mur du filon croiseur, suivant la ligne d'inclinaison de ce dernier. Telle est la règle énoncée d'abord par Schmidt.

Elle est confirmée par un grand nombre de faits observés par Schmidt lui-même, par le Dr Christian Zimmermann, et par d'autres géologues ou ingénieurs des mines.

On conçoit qu'en effet, dans la dislocation qui a eu lieu, la masse située au toit du croiseur a dû généralement s'abaisser par rapport à la masse située au mur. La fente qui constitue le filon croiseur a pu se former dans l'origine, soit parce qu'une portion de terrain qui n'était pas suffisamment soutenue à sa base, s'est séparée du reste. Dans ce cas la séparation a dû avoir lieu suivant une surface inclinée à l'horizon, et la masse détachée, celle qui plus tard a constitué le toit du croiseur, a dû, en vertu de son poids, glisser sur la masse demeurée immobile. C'est ce que nous voyons arriver journellement, dans les éboulements en masses, des terrains de peu de consistance, qui ne sont pas soutenus à leur base. Le glissement du toit sur le mur est très-apparent en général, dans les failles qui traversent les terrains stratifiés, surtout les plus modernes. Les fentes primitives qui ont donné lieu aux failles, peuvent aussi avoir été déterminées par l'action de forces intérieures qui ont rompu l'écorce ou enveloppe supérieure. Les fentes formées ont été alors les soupiraux par lesquels les matières gazeuses, ou fondues et liquides sont venues à la surface. A la suite de ces éruptions, il est resté dans l'intérieur des espaces vides, et les masses soulevées et détachées les unes des autres, ont dû s'abaisser de nouveau en obéissant aux lois de la pesanteur. Dans cette seconde période où elles ont pris l'assiette définitive qu'elles ont conservée, c'est encore la région du toit qui a dû généralement glisser sur celle du mur ; car autrement les masses du toit demeurées en surplomb, par suite de l'affaissement du mur, se seraient détachées, et auraient donné lieu à de nouvelles fentes. Cependant les fragments détachés ont pu s'arc-bouter les uns contre les autres, et quelques-uns d'entre eux ont pu se relever, tandis que les autres s'affaissaient ; de même que dans une voûte qui se renverse en dedans, les voussoirs voisins du sommet sont repoussés et soulevés par la pression des voussoirs contigus. On comprend donc que le glissement du toit sur le mur ne peut être une règle absolue, ainsi que l'ont prétendu quelques personnes. D'ailleurs, beaucoup de fentes de filons sont tellement irrégulières dans leur direction et leur inclinaison, qu'il est impossible d'admettre qu'il y ait eu un tassement des parties disloquées du terrain par simple glissement des unes sur les autres. Comment, par exemple, pourrait-on concevoir un glissement régulier du toit sur le mur des filons *en escaliers*, observés par Werner, des filons du Derbyshire, dont nous avons parlé dans le chapitre précédent, etc. ?

Nous admettons, en conséquence, la règle de Schmidt, non comme absolument générale et nécessaire, mais comme conforme à la plupart des faits observés sur des failles ou filons réguliers, et nous conseillons de la suivre, en l'absence de faits locaux précis qui indiquent la direction à donner aux travaux de recherche. Voici d'ailleurs comment on procédera, en partant de cette règle.

Application de la règle de Schmidt. — Quand un filon ou une couche seront interrompus par une faille ou un croiseur, on reconnaîtra d'abord la direction et l'inclinaison du croiseur; connaissant d'ailleurs l'inclinaison et la direction du gîte interrompu, on déterminera la projection horizontale de l'intersection commune de ce gîte et du croiseur. Ce tracé graphique se fera d'après les principes posés dans l'article précédent.

Soient FC et C″CC′, *fig.* 5, *Pl. II*, les traces horizontales des plans du gîte exploité et du filon croiseur comprenant entre elles l'angle FCC′ que l'on pourra facilement mesurer, et que nous désignerons par γ. Supposons que les inclinaisons du gîte et du croiseur soient dans le sens indiqué par les flèches xy et zv, et que les angles d'inclinaison soient respectivement égaux aux angles bAM, $b'A'M'$, *fig.* 6 et 7, que nous appellerons α et β. L'on prendra une longueur arbitraire $Aa = A'a'$; on construira les triangles rectangles Aab, $A'a'b'$; on portera les distances $ab, a'b'$, sur des perpendiculaires respectives aux traces FC, C″CC′ élevées dans le sens des inclinaisons; on tracera les parallèles OX, OY à ces traces, et la droite indéfinie COE sera la projection horizontale de l'intersection commune du plan du gîte et du plan du croiseur, ou plus exactement du plan du gîte par le plan du toit du croiseur, puisque la figure suppose, ainsi que l'indiquent les flèches, que c'est le toit de celui-ci que l'on a rencontré.

Cela posé, si l'on admet que, dans la dislocation du terrain, la masse située au toit du filon croiseur a glissé sur le mur de celui-ci, suivant la ligne de plus grande pente, il s'ensuivra que si l'on perce le croiseur d'outre en outre par une galerie normale à sa direction, cette galerie débouchera dans la masse située au mur de la partie du gîte rejetée. L'intersection commune du plan du mur du croiseur et du plan du gîte, après le rejet, sera une ligne parallèle à l'intersection dont CE est la projection horizontale, mais située au-dessus de celle-ci dans le plan du croiseur. Si donc on mène la droite CM, perpendiculaire à la trace CC′, et dirigée du côté opposé à la pointe de la flèche zv, cette droite sera la projection horizontale de la ligne de plus grande pente du croiseur, dans sa partie ascendante à partir de CC′, et ira couper quelque part l'intersection du gîte interrompu et

du mur du croiseur, à une distance d'autant plus grande que l'étendue du glissement aura été plus grande. Dans tous les cas, la projection horizontale de cette intersection des deux lignes se trouvera quelque part sur CM, et si elle tombe, par exemple, en D, la projection horizontale de l'intersection commune du gîte rejeté et du mur du croiseur, sera la ligne indéfinie DD', mené par le point D, parallèlement à CE. Cette projection rencontrera la trace CC' du croiseur, en un certain point L situé sur la partie CC' de la trace C''C', et le point L appartiendra nécessairement à la trace du plan du gîte rejeté sur le plan horizontal de projection ; cette trace, qui doit d'ailleurs être parallèle à CF, sera la droite indéfinie KLI menée par le point L parallèlement à CF.

Cette construction graphique nous montre que la suite du gîte interrompu sera rencontrée par une galerie quelconque, exécutée à partir du point C, et qui sera située tout entière du côté du toit du gîte, avant le rejet, et au mur du croiseur, tandis que les galeries qui ne satisferaient pas à cette double condition, s'en écarteraient de plus en plus.

La galerie de jonction la plus courte sera celle qui, partant du point C pris sur le mur du croiseur, sera dirigée perpendiculairement au plan du gîte, pourvu toutefois que cette galerie demeure derrière le mur du croiseur. La projection horizontale de son axe sera la droite CN perpendiculaire à IK. On obtiendra sa longueur, en rabattant le plan vertical dont la trace est CN sur le plan horizontal. L'intersection du gîte interrompu, et du plan vertical se rabattra suivant la ligne NP faisant avec la projection horizontale NC un angle CNP égal à l'inclinaison α du gîte, et la perpendiculaire CP à la droite NP sera la longueur de la galerie de plus courte distance; menant ensuite PQ perpendiculaire à CN, le point Q sera la projection du point de rencontre de la galerie et du plan du gîte rejeté. Ce point, tombant, dans la figure, en deçà de la projection horizontale de l'intersection commune DLD', il en résulte que la galerie CP n'est point exécutable dans ce cas, puisqu'elle se trouverait dans la région du toit, et en deçà du croiseur. La bande indéfinie comprise entre les deux droites CE' et LD, à partir de la ligne CL, est en effet la lacune existante, par suite du rejet, dans la projection horizontale de la partie du gîte, qui est située en dessus du plan horizontal de projection.

La galerie de plus courte distance est alors une galerie inclinée exécutée sur le mur du croiseur, et dirigée perpendiculairement à l'intersection du gîte interrompu et du plan de ce mur. Pour déter-

miner sa longueur et sa position il faut rabattre sur le plan horizontal, en le faisant tourner autour de sa trace horizontale, le plan du croiseur, et tracer dans le rabattement l'intersection commune qui est projetée suivant DLD'. Le point D de cette intersection commune vient, dans le rabattement, se placer sur le prolongement de CD, en un point S tel que l'on ait : CS : CD :: A'b' : a'b' (*fig.* 7). Le point S étant ainsi déterminé, la ligne LS sera l'intersection rabattue. La droite CR perpendiculaire à LS sera la longueur de la galerie menée dans le croiseur, perpendiculairement à l'intersection commune, et l'angle RCL sera celui que la direction de l'axe de cette galerie fera avec la trace horizontale du croiseur, ce qui suffira pour donner sa direction. La projection horizontale du point R devra se trouver d'ailleurs sur LD, et sera par conséquent en R', RR' étant perpendiculaire à CC'.

Ordinairement il sera plus avantageux de rechercher le gîte par une galerie horizontale. La galerie horizontale la plus courte que l'on puisse faire sera perpendiculaire à la trace horizontale du gîte interrompu. CN, perpendiculaire à LK, sera l'axe de cette galerie. L'angle NCL sera l'angle compris entre cet axe et la trace du croiseur.

Souvent on va à la recherche du gîte par une galerie horizontale exécutée dans le croiseur. Ici cette galerie devrait être appuyée sur le mur, et sa longueur serait égale à CL.

L'épure très-simple que nous venons d'expliquer avec détail suffit donc pour déterminer la direction des recherches à faire, en admettant la règle de Schmidt, et les rapports entre les longueurs des diverses galeries que l'on peut exécuter pour atteindre le gîte interrompu, en cheminant, soit dans le plan du croiseur, soit à travers la roche située derrière le croiseur. On ne peut, en effet, considérer que les rapports des longueurs des lignes CP, CR, CN et CL, puisque leurs grandeurs absolues dépendent de l'étendue du glissement qui demeure inconnu, du moins dans le cas général. La question se réduit à la détermination des éléments d'un angle trièdre dans lequel on connaît un angle plan et les deux angles dièdres adjacents. C'est un des problèmes les plus simples de la géométrie descriptive, qui peut aussi être résolu par la trigonométrie rectiligne ou sphérique.

Il peut être utile de connaître les rapports des galeries CP, CR, CN et CL en fonction des lignes trigonométriques des angles α, β et γ. On voit d'abord que, D désignant la longueur CP de la galerie de plus courte distance, on a dans le triangle rectangle CPN, dont l'angle en N est égal à α :

$$CN = \frac{CP}{\sin\alpha} = \frac{D}{\sin\alpha}.$$

Puis dans le triangle rectangle CNL, dont l'angle en L est égal à γ :

$$CL = \frac{CN}{\sin\gamma} = \frac{D}{\sin\alpha\sin\gamma}.$$

Quant à la détermination de la distance CR, perpendiculaire à l'intersection commune, menée dans le plan du croiseur, elle exige d'abord que l'on calcule l'angle CLS que l'intersection commune forme avec la trace du croiseur. On parvient, par les principes de la trigonométrie rectiligne ou sphérique, aux valeurs suivantes (1) :

$$CR = \frac{D}{\cos\alpha\sqrt{(\text{tang}\,\alpha\cos\gamma\cos\beta + \sin\beta)^2 + \text{tang}^2\alpha\sin^2\gamma}}$$

$$\cos RCL = \frac{CR}{CL} = \frac{\text{tang}\,\alpha\sin\gamma}{\sqrt{(\text{tang}\,\alpha\cos\gamma\cos\beta + \sin\beta)^2 + \text{tang}^2\alpha\sin^2\gamma}},$$

---

(1) Si on désigne par x et y les angles respectifs que la projection CE de l'intersection commune forme avec les traces horizontales CC′ et CF du croiseur et du croisé, on voit d'abord que la somme des angles

$$x + y = \gamma. \qquad (1)$$

De plus, les sinus des angles x et y sont entre eux dans le rapport des longueurs $a'b'$ et ab, ou dans le rapport inverse des tangentes des angles β et α :

$$\sin x : \sin y :: \text{tang}\,\alpha : \text{tang}\,\beta. \qquad (2)$$

De la première équation, on tire :

$$\sin x\cos y + \cos x\sin y = \sin\gamma. \qquad (a)$$

On a d'ailleurs par la proportion (2) :

$$\sin y = \sin x\,\frac{\text{tang}\,\beta}{\text{tang}\,\alpha}\,;\ \cos y = \frac{\sqrt{\text{tang}^2\alpha - \text{tang}^2\beta\sin^2 x}}{\text{tang}\,\alpha}$$

Par la substitution de ces valeurs de $\sin y$ et $\cos y$, l'équation (a) devient :

$$\frac{\sin x}{\text{tang}\,\alpha}\sqrt{\text{tang}^2\alpha - \text{tang}^2\beta\sin^2 x} + \sin x\cos x\,\frac{\text{tang}\,\beta}{\text{tang}\,\alpha} = \sin\gamma.$$

Cette dernière équation devient, lorsqu'on a fait disparaître le radical :

$$\sin^2 x\,(\text{tang}^2\alpha - \sin^2 x\,\text{tang}^2\beta) = \sin^2\gamma\,\text{tang}^2\alpha$$
$$+ \sin^2 x\cos^2 x\,\text{tang}^2\beta - 2\sin x\cos x\,\text{tang}\,\alpha\,\text{tang}\,\beta\sin\gamma\,;$$

et en divisant par $\sin^2 x$:

Digitized by Google

Nous ne nous arrêterons pas à discuter les résultats du tracé graphique, dans les différentes circonstances qui peuvent se présenter. Il est assez simple pour que les personnes un peu familières avec la géo-

---

$$\tang^2 \alpha - \sin^2 x \tang^2 6 = \frac{\sin^2 \gamma \tang^2 \alpha}{\sin^2 x} + \cos^2 x \tang^2 6 - $$
$$- \frac{2 \cos x}{\sin x} \tang \alpha \tang 6 \sin \gamma ;$$

remplaçant $\cos^2 x$ par $1 - \sin^2 x$, et observant que $\frac{\cos x}{\sin x} = \cot x$,

et $\frac{1}{\sin^2 x} = 1 + \cot^2 x$, il vient:

$$\tang^2 \alpha = \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma + \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma \cot^2 x +$$
$$+ \tang^2 6 - 2 \cot x \tang \alpha \tang 6 \sin \gamma,$$

équation qui se réduit à :

$$\tang^2 \alpha \cos^2 \gamma = (\tang \alpha \sin \gamma \cot x - \tang 6)^2,$$

et en extrayant les racines carrées des deux membres :

$$\tang \alpha \sin \gamma \cot x - \tang 6 = \tang \alpha \cos \gamma,$$

d'où :

$$\cot x = \frac{\tang 6 + \tang \alpha \cos \gamma}{\tang \alpha \sin \gamma} = \cot \gamma + \frac{\tang 6}{\tang \alpha \sin \gamma}.$$

On aurait de même :

$$\cot y = \cot \gamma + \frac{\tang \alpha}{\tang 6 \sin \gamma};$$

mais l'angle ECL = CLD est la projection horizontale de l'angle que l'intersection commune projetée suivant CE forme dans l'espace avec la trace CC' du croiseur, angle qui est égal à CLS. Or les tangentes des angles CLD et CLS sont entre elles comme CD : CS :: cos 6 : 1. Donc

$$\tang CLS = \frac{\tang x}{\cos 6} = \frac{1}{\cot x \cos 6},$$

remplaçant $\cot x$ par sa valeur :

$$\tang CLS = \frac{\tang \alpha \sin \gamma}{\sin 6 + \tang \alpha \cos \gamma \cos 6};$$

d'où l'on tire :

$$\sin CLS = \cos RCL = \frac{\tang \alpha \sin \gamma}{\sqrt{(\sin 6 + \tang \alpha \cos 6 \cos \gamma)^2 + \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma}},$$

$$CR = CL \sin CLS = \frac{D}{\sin \alpha \sin \gamma} \sin CLS =$$

$$= \frac{D}{\cos \alpha \sqrt{(\sin 6 + \tang \alpha \cos 6 \cos \gamma)^2 + \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma}}.$$

métrie puissent résoudre tous les cas qui se présenteront. Dans le cas où le plan du croiseur est vertical, la règle de Schmidt n'indique pas le sens du rejet, et il faut alors avoir recours à d'autres indices. Si l'intersection commune du plan du gîte et du plan du croiseur, est dirigée suivant la ligne d'inclinaison du croiseur, la règle de Schmidt indique que le rejet dans le sens horizontal est nul. La projection CE de l'intersection commune est alors perpendiculaire à la trace du croiseur, et en se reportant au contenu de la note (1) on voit que dans ce cas, l'angle x étant droit, $\cot x = 0$. Par conséquent on a la relation : $\cot \gamma + \frac{\tang \beta}{\tang \alpha \sin \gamma} = 0$, ou $\tang \beta + \tang \alpha \cos \gamma = 0$. La distance D est alors nulle, quelle que soit l'étendue du glissement CS.

Des rejets occasionnés par un même croiseur. — Lorsqu'un gîte interrompu par un filon croiseur aura été une fois retrouvé, l'on n'éprouvera aucun embarras pour retrouver ce même gîte, s'il vient à être interrompu par le même croiseur à des niveaux différents; car il est évident que le sens du rejet sera le même. Ceci suppose toutefois que le déplacement relatif des deux masses disjointes par le croiseur a consisté dans un simple mouvement de translation; il en sera nécessairement ainsi, lorsque l'inclinaison et la direction du gîte coupé et rejeté seront les mêmes des deux côtés du croiseur, et c'est ce qui arrive presque toujours.

Si d'autres gîtes que celui qui a déjà été retrouvé, viennent à être interrompus et rejetés par le même croiseur, la question du sens et même de l'étendne du rejet qu'auront subi ces nouveaux gîtes, se trouvera aussi résolue d'avance par le résultat des premières recherches, si toutefois on admet que le déplacement relatif des masses disjointes a consisté dans un glissement de l'une sur l'autre, suivant la ligne de plus grande pente, soit que ce glissement ait eu lieu suivant la règle de Schmidt, soit qu'il ait eu lieu en sens inverse. Il sera en effet facile de construire une épure semblable à celle de la *fig.* 5, dans laquelle la trace FC du premier gîte sera remplacée par la trace du nouveau gîte interrompu, et dans cette épure, on connaîtra, d'après les premières recherches, le sens et la longueur de la ligne CS perpendiculaire à la trace du croiseur, qui mesurera l'écartement des traces des deux parties du gîte, avant et après le rejet, sur le plan du croiseur. On pourra même, par un calcul trigonométrique très-simple, se dispenser de construire une épure.

En effet, dans la *fig.* 5, toutes les distances CP, CN, CL et CR, que nous avons exprimées en fonction de CP ou D, peuvent aussi être exprimées en fonctions de la longueur CS, qui exprime la quantité dont

le toit du croiseur a glissé sur son mur, ou plus généralement l'abaissement d'une des parois par rapport à l'autre, mesurée suivant la ligne d'inclinaison du croiseur.

Ainsi on a :

$$CS = \frac{CR}{\cos RCS} = \frac{CR}{\sin RCL}.$$

Mais

$$\sin RCL = \sqrt{1 - \cos^2 RCL} =$$

$$= \frac{\tang \alpha \cos \gamma \cos \beta + \sin \beta}{\sqrt{(\tang \alpha \cos \gamma \cos \beta + \sin \beta)^2 + \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma}}.$$

De cette valeur de sin RCL et de la valeur de CR en fonction de la distance D, on conclut :

$$CS = \frac{D}{\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha},$$

$$D = CS (\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha).$$

Portant cette valeur de D, dans les expressions des distances CN, CL et CR, on a :

$$CN = CS \left(\cos \beta \cos \gamma + \frac{\sin \beta}{\tang \alpha} \right), \quad (1)$$

$$CL = CS \left(\frac{\cos \beta}{\tang \gamma} + \frac{\sin \beta}{\tang \alpha \sin \gamma} \right), \quad (2)$$

$$CR = \frac{CS (\tang \alpha \cos \gamma \cos \beta + \sin \beta)}{\sqrt{(\tang \alpha \cos \gamma \cos \beta + \sin \beta)^2 + \tang^2 \alpha \sin^2 \gamma}} \quad (3)$$

Si le filon croiseur déjà rencontré, coupe un nouveau gîte, et si d'ailleurs sa direction et son inclinaison sont restées les mêmes, l'angle β conservera la valeur que l'on a déjà observée au premier croisement; les angles α et γ seront différents. Comme d'ailleurs CS aura conservé la même valeur, dans l'hypothèse admise d'un simple glissement, les formules (1) (2) (3) fourniront les valeurs des distances CN, CL, et CR relatives au rejet du second gîte, en y remplaçant les angles α et γ par les valeurs particulières qui conviennent à ce gîte et à son intersection avec le même croiseur. Ces valeurs, comme celles qui sont relatives à la première intersection, contiendront le facteur CS ; celui-ci étant

commun de part et d'autre, les rapports de longueur des lignes analogues seront indépendants de ce facteur. Par exemple, supposons que, dans le premier rejet, on ait trouvé le prolongement du gîte interrompu, en cheminant horizontalement dans le croiseur. On connaîtra alors, en même temps que les angles α, β, γ, relatifs à ce croisement, la distance CL, et l'on aura entre CL et CS la relation exprimée par l'équation (2) dans laquelle tout sera connu excepté CS. Supposons que dans le croisement d'un autre gîte par le même croiseur on trouve que l'angle β n'a point varié, et soient α', γ' les grandeurs respectives de l'angle d'inclinaison du nouveau gîte, et de l'angle compris entre les traces horizontales du croiseur et du nouveau gîte; l'angle γ' doit être compté à partir de la même direction du croiseur, et dans le même sens que l'on avait compté l'angle γ. Ainsi il peut varier depuis 0° jusqu'à 360°; il serait supérieur à 180°, dans le cas où le nouveau gîte rencontrerait le mur du croiseur, tandis que le premier gîte aurait rencontré son toit. Quant à l'angle α, on le considérera toujours comme plus petit qu'un angle droit, mais il faudra le supposer positif ou négatif, suivant que l'inclinaison du nouveau gîte sera dans le même sens que l'inclinaison du premier, ou en sens inverse, le sens de l'inclinaison étant pris par rapport à l'orientation de la trace horizontale du croiseur. Les valeurs des angles α' et γ' ainsi déterminées, étant portées dans la formule (2), on aura pour la distance C'L', qu'il faudra parcourir horizontalement dans le croiseur, pour retrouver le nouveau gîte:

$$C'L' = CS\left(\frac{\cos\beta}{\tang\gamma'} + \frac{\sin\beta}{\tang\alpha'\sin\gamma'}\right).$$

Divisant cette valeur de C'L' par la valeur de CL, le facteur CS disparaîtra et il viendra:

$$\frac{C'L'}{CL} = \frac{\dfrac{\cos\beta}{\tang\gamma'} + \dfrac{\sin\beta}{\tang\alpha'\sin\gamma'}}{\dfrac{\cos\beta}{\tang\gamma} + \dfrac{\sin\beta}{\tang\alpha\sin\gamma}}.$$

Ce sera le rapport des distances C'L' et CL dont la première est connue par le résultat des anciennes recherches. Il faut remarquer que la valeur de C'L', pourrait être négative, puisque l'angle γ' peut varier entre 0° et 360°, et que l'angle α' peut être positif ou négatif. Une valeur positive de CL indiquera que le gîte doit être recherché en cheminant dans le croiseur, dans le même sens que la première fois. Si la valeur est négative, il faudra cheminer en sens opposé.

Éclaircissons ceci par des exemples :

Supposons que l'on vienne à rencontrer le même croiseur que la première fois, en cheminant dans le même gîte, dont l'allure n'aura point varié, mais qu'on rencontre le croiseur par son mur, au lieu de le rencontrer par son toit, comme cela a eu lieu d'abord. Dans ce cas l'on aura :

$$\alpha' = \alpha,$$

$$\gamma' = 180^\circ + \gamma.$$

Ainsi :

$$\text{tang}\,\gamma' = -\text{tang}\,\gamma,\ \sin\gamma' = -\sin\gamma,\ \text{tang}\,\alpha' = \text{tang}\,\alpha,$$

on trouvera donc :

$$\frac{C'L'}{CL} = -1.$$

C'est-à-dire que pour retrouver le gîte rejeté, il faudra cheminer dans le croiseur horizontalement, en sens inverse de la direction que l'on a suivie d'abord, et parcourir une longueur égale à celle que l'on a d'abord parcourue. On voit en effet par la figure, que si l'on était arrivé au croiseur, en suivant la direction KL, il faudrait parcourir, pour retrouver le gîte, le même chemin LC que l'on aurait parcouru la première fois en venant de C en L.

Supposons maintenant que l'on arrive au croiseur C″ C C′ dans la région de son toit, en suivant un gîte dont la direction soit parallèle à celle du filon FC, mais dont l'inclinaison soit en sens inverse et égale numériquement à celle de ce filon, on aura alors :

$$\alpha' = -\alpha,$$

$$\gamma' = \gamma,$$

d'où :

$$\text{tang}\,\alpha' = -\text{tang}\,\alpha,$$

$$\frac{C'L'}{CL} = \frac{\dfrac{\cos 6}{\text{tang}\,\gamma} - \dfrac{\sin 6}{\text{tang}\,\alpha \sin\gamma}}{\dfrac{\cos 6}{\text{tang}\,\gamma} + \dfrac{\sin 6}{\text{tang}\,\alpha \sin\gamma}}.$$

La valeur de C′L′ sera positive ou négative suivant que l'on aura :

$$\frac{\cos 6}{\text{tang}\,\gamma} > \text{ ou } < \frac{\sin 6}{\text{tang}\,\alpha \sin\gamma}.$$

Digitized by Google

Dans le premier cas il faudra marcher dans le croiseur, dans la même direction que la première fois, mais la distance à parcourir sera plus petite. Dans le second cas, il faudra marcher dans le croiseur suivant une direction opposée, de C vers C'' (1).

---

(1) Dans le cas le plus général, et sans faire aucune hypothèse sur le genre de dislocation qui accompagne une faille ou filon, le déplacement relatif des deux masses de terrain qui sont séparées par ce filon, peut toujours être considéré comme composé d'un mouvement de translation et d'un mouvement de rotation de l'une des masses, par rapport à l'autre considérée comme fixe. De plus, les mouvements de translation et de rotation n'ont pu avoir lieu que dans des plans parallèles à celui de la faille ou filon. Il résulte de là que, si l'on détermine les intersections communes des deux parties d'une couche ou d'un filon interrompu par un croiseur avec le plan de ce croiseur, l'angle compris entre ces intersections mesurera la quantité angulaire dont l'une des masses disjointes par la faille a tourné par rapport à l'autre. Si les deux parties du gîte interrompu sont parallèles entre elles, la rotation sera nulle; le déplacement relatif consistera en un simple glissement. Si, au contraire, elles ne sont pas parallèles, elles couperont le plan du croiseur suivant deux lignes qui comprendront entre elles un angle égal à celui dont l'une des masses a tourné, en s'appuyant sur l'autre par le plan de séparation qui est celui du croiseur. Donc, si plusieurs gîtes sont interrompus par le même croiseur, les intersections des deux parties d'un même gîte séparées par le croiseur avec le plan de celui-ci, formeront entre elles un angle constant.

Quant au sens et à l'étendue du glissement relatif, il ne peut être déterminé que par la connaissance du déplacement relatif d'un point de l'une des masses disjointes. Or, si deux gîtes non parallèles entre eux ont été interrompus par le même croiseur, et si l'on a retrouvé ces gîtes au delà du croiseur, on aura les éléments nécessaires pour déterminer le sens et l'étendue du mouvement de translation, car le point de rencontre des traces des deux gîtes non parallèles sur le plan du croiseur sera un point singulier, dont la position en deçà et au delà de la faille pourra être déterminée par une épure; la ligne qui joindra les deux positions de ce point, déterminera le sens et l'étendue du déplacement de translation.

Il serait à désirer que l'on traçât avec beaucoup de soin les plans relatifs aux interruptions et aux rejets des gîtes exploités, de manière à avoir ainsi une connaissance géométrique exacte des dislocations de terrain. Ces observations pourraient être d'un grand intérêt pour la géologie de certains districts, et il est difficile de les faire ailleurs que dans les mines.

Elles fourniraient, en outre, des données exactes sur les accidents qui peuvent être rencontrés dans la suite de l'exploitation, et éviteraient souvent des dépenses inutiles.

Filons limités par un croiseur. Doubles rejets.— Il arrive souvent que l'on trouve dans le croiseur des traces du filon exploité ; le mieux est alors de suivre ces traces, qui conduisent ordinairement au gîte rejeté. On a cependant des exemples de filons qui n'ont point été retrouvés et qui paraissent définitivement limités par un croiseur. On suppose que, dans ce cas, le croiseur préexistait au filon exploité, et que la fente de celui-ci a été limitée dans son étendue par la fente antérieure du croiseur.

Enfin on a cité des exemples de *doubles rejets*, c'est-à-dire, dans lesquels aucun des deux filons ne croise l'autre d'une manière tranchée, pour se continuer sans interruption ; tous deux sont déplacés après le croisement. On voit souvent des exemples semblables dans les veinules qui se croisent irrégulièrement, au milieu de la masse d'un stockwerk. Mais ces petits filons ont vraisemblablement une origine différente des grands filons qui traversent souvent plusieurs terrains d'origines différentes. S'il existe aussi des doubles rejets dans ceux-ci, ils doivent provenir, ou de ce que les deux fentes sont contemporaines, ou de ce que celui des deux filons qui a été d'abord croisé et rejeté par l'autre, s'est rouvert postérieurement au remplissage de celui-ci, de façon que les deux masses de terrain qu'il sépare ont subi un nouveau déplacement relatif, qui a entraîné le rejet du second filon. En tous cas, on ne conçoit pas la possibilité que dans ces doubles rejets, la trace du filon principal et celle du croiseur aient complètement disparu. Ou bien il y aura au point de croisement un élargissement considérable, donnant lieu à une espèce d'amas duquel paraîtront se détacher les deux filons ; ou bien le filon principal et le croiseur sembleront constituer un même filon contourné, tandis qu'une fissure étroite réunira cette sorte de filon à la seconde partie du filon principal et du croiseur. La *fig*, 8, *Pl. II*, représente un double rejet avec élargissement au croisement. La *fig*. 9 représente un double rejet avec compression de l'un des filons : on dirait de deux filons distincts et contournés dans leur direction, qui se rapprochent l'un de l'autre par la convexité de la ligne de direction, pour s'écarter ensuite. Ces deux filons sont réunis par une simple fissure, qui n'est autre chose que la trace du filon NN, lequel est rejeté dans le sens horizontal d'une quantité égale à la distance horizontale du toit au mur (1). On rencontre en

(1) Les *fig*. 8 et 9, *Pl. II*, sont empruntées à l'ouvrage du Dr Christian Zimmermann, intitulé : *Die Wieder aufrichtung verworfener gänge, Lager und flötze*. L'auteur adopte la règle de Schmidt qu'il confirme par de nombreux exemples empruntés principalement aux filons métalliques du Hartz.

effet, assez fréquemment, dans l'exploitation des filons métalliques, des accidents semblables à celui qui est représenté *fig.* 9; il y en a un très-marqué à Sainte-Marie-aux-Mines (département du Haut-Rhin) entre le filon de Surlatte et le filon de Saint-Philippe : je n'ai pu m'assurer si c'étaient réellement deux filons distincts et contournés qui se rapprochaient pour s'écarter ensuite, ou bien s'il y avait une liaison entre les deux gites.

Les recherches du mineur ont souvent pour but la découverte du prolongement de gîtes en couches ou en filons, déjà connus, sur des points éloignés de ceux où ces gîtes sont exploités. Quant aux filons, lorsqu'on ne veut pas les explorer par des galeries souterraines continues, qui occasionneraient des dépenses trop considérables, on se borne à rechercher le prolongement de l'affleurement, au moyen de tranchées peu profondes, plus ou moins distantes les unes des autres; sur les points où l'on a mis cet affleurement à découvert, on explore le filon par des travaux du genre de ceux que nous avons indiqués au commencement de ce chapitre. On peut aussi, après s'être assuré que le filon pénètre dans une montagne écartée de celle où il est connu, aller le rejoindre, en pratiquant une galerie horizontale prise sur le flanc de cette montagne.

Recherches de couches dont les affleurements sont recouverts. Puits verticaux et trous forés. — Quand il s'agit d'une couche ou de plusieurs couches parallèles qui ne viennent point affleurer au jour, parce que le terrain dont elles font partie s'enfonce sous un terrain plus moderne, on peut, après avoir reconnu la direction et l'inclinaison des couches sur les points où elles se montrent à découvert, exécuter à travers le terrain sous lequel elles disparaissent, soit des puits verticaux, soit des trous de sonde qui suffisent pour faire connaître par les débris que la sonde ramène des profondeurs successives auxquelles elle est parvenue, l'épaisseur du terrain supérieur, l'ordre, la puissance et la nature des couches du terrain inférieur qui sont l'objet des recherches. La sonde ne peut être employée qu'à la recherche des couches et non à celle des filons; car dans les filons, les substances utiles sont disséminées irrégulièrement au milieu des gangues stériles, de sorte que la sonde pourrait fort bien ne ramener que des gangues, bien qu'elle traversât le filon dans une partie assez riche. D'ailleurs l'inclinaison des filons étant ordinairement assez rapprochée de 90 degrés ou du plan vertical, la sonde ne ferait pas connaître la puissance du filon. Par la même raison, les recherches par la sonde s'appliquent avec beaucoup plus d'avantage aux couches peu inclinées qu'à celles qui se rapprochent du plan vertical. Il est évi-

ent d'ailleurs qu'on ne doit préférer les trous forés avec la sonde à des puits verticaux, qui procurent des notions beaucoup plus précises sur la nature du gîte, et peuvent être utilisés pour des recherches et pour l'exploitation ultérieures, que dans le cas où les dépenses de creusement des puits verticaux seraient beaucoup plus considérables que celles qu'exigeront de simples forages.

On recherche aussi quelquefois par des puits verticaux ou des trous forés, le prolongement de couches interrompues par des failles, lorsque celles-ci sont extrêmement larges, ou accompagnées d'une dislocation considérable du terrain traversé.

Reprise d'anciennes mines abandonnées. — Parmi les travaux de recherche, les plus dispendieux sont ordinairement ceux qui ont pour but la reprise d'anciennes mines métalliques abandonnées depuis longtemps. Avant de se livrer à une entreprise de ce genre, il faut vérifier s'il n'existe pas dans les bibliothèques, ou dans les archives locales, des documents écrits sur les mines que l'on a en vue; on pourra y trouver, non pas des descriptions exactes qui manquent presque toujours, mais au moins des indications sur les produits des mines à diverses époques, et à diverses profondeurs, sur la date de l'abandon des travaux, sur les causes qui l'ont déterminé. Si l'abandon ne remonte pas au delà de la durée d'un âge d'homme, on interrogera les souvenirs des vieillards du pays, et des ouvriers qui survivent. On contrôlera les renseignements puisés dans les livres ou la tradition, par les travaux souterrains encore existants, les vestiges qu'auront laissés les travaux éboulés, et les tas de matières extraites, abandonnées comme inutiles, sur le carreau des anciens puits ou galeries.

Les causes de la cessation des travaux sont le point sur lequel on devra principalement fixer son attention. L'abandon peut avoir été déterminé par l'appauvrissement du gîte, le défaut de capitaux, la trop grande abondance d'eaux, la dépossession des propriétaires par la violence, les fléaux qui, à des époques reculées, auraient ravagé toute la contrée, comme la peste ou la famine. L'appauvrissement du gîte est malheureusement la cause la plus simple et la plus ordinaire; or c'est précisément celle que les anciens documents, du moins ceux qui ont été écrits après l'événement, n'indiquent presque jamais. Leurs auteurs, habitants de la localité, ne conviennent pas que les mines qui furent autrefois une source de richesse pour la contrée, soient épuisées, et ils attribuent généralement l'abandon à des accidents de force majeure, qui peuvent bien n'avoir été que des causes secondaires. On doit donc se tenir en garde contre ces documents,

aussi bien que contre les récits des vieux mineurs qui auraient travaillé dans des mines délaissées à une époque assez récente. Il est probable que, sauf des exceptions peu nombreuses, les mines qui ont été l'objet d'exploitations étendues et importantes, n'ont été définitivement délaissées que parce que leur exploitation ne pouvait être continuée avec bénéfice, par les procédés en usage, à l'époque de l'abandon. Mais les progrès modernes de la minéralurgie et surtout de la mécanique, rendent aujourd'hui possible la reprise de mines délaissées faute de moyens d'épuisement des eaux, ou à cause de la difficulté de dégager les métaux, de leurs gangues d'abord, et ensuite des substances avec lesquelles ils sont en combinaison.

Celui donc qui aura l'intention de reprendre d'anciennes mines, devra examiner attentivement les déblais abandonnés sur le carreau de ces mines, ou sur l'emplacement des anciennes laveries; il s'attachera surtout aux déblais existants à l'orifice de la galerie la plus profonde, parce que c'est par là que sont sortis les produits des derniers temps de l'exploitation. Il verra si le triage était fait soigneusement; il recueillera les morceaux de minerais pour les soumettre à l'analyse chimique; il examinera à la loupe, et essayera dans le laboratoire, les sables qui se trouveront sur l'emplacement des anciennes laveries, et vérifiera si des parties notables de minerais n'ont pas été perdues, par les anciens exploitants, dans les opérations du lavage. Si les déblais abandonnés, soit sur le carreau de la mine, soit aux laveries, sont encore assez riches en minerai, si ce mineral est du genre de ceux dont le traitement, difficile par la voie sèche, a reçu dans ces derniers temps, de notables perfectionnements, le succès de la reprise acquerra quelque probabilité. Cependant il ne faudra pas perdre de vue que la valeur des métaux et surtout des métaux précieux a beaucoup diminué, depuis le seizième siècle, par rapport au prix de la main-d'œuvre, qui est l'élément principal d'où dépendent les frais d'extractions des minerais; les bois nécessaires au soutènement des excavations souterraines et à la fonte des minerais étaient aussi généralement autrefois beaucoup plus abondants et moins chers qu'ils ne le sont aujourd'hui. Ces considérations sont de nature à diminuer la confiance que pourrait inspirer la certitude d'un triage peu soigné ou d'un traitement défectueux.

Si les mines délaissées sont arrivées à une profondeur un peu grande au dessous des vallées du pays, l'abandon a pu être déterminé par la trop grande abondance des eaux d'infiltration, dont l'épuisement serait devenu trop dispendieux ou même impossible à l'aide des machines alors connues. C'est dans ce cas que la reprise peut être tentée,

avec le plus de chance de succès, parce que le perfectionnement des machines rend aujourd'hui facile, ce qui était regardé comme impossible, il y a un siècle. Néanmoins, les entreprises de ce genre nécessitent toujours des dépenses considérables. Ainsi, le gîte étant supposé riche, les anciens auront lutté, tant qu'ils l'auront pu, contre l'envahissement des eaux. Quand celles-ci seront devenues tellement abondantes, qu'ils auront été forcés de renoncer à s'approfondir davantage, ils seront revenus sur leurs pas, et auront glané dans tous les travaux supérieurs, en exploitant les parties moins riches qu'ils avaient méprisées dans l'origine. Aussi, arrive-t-il habituellement que toutes les parties où les anciens ont pénétré sont à peu près complétement exploitées, et l'on ne doit pas compter sur les produits qui pourraient être extraits du champ fouillé par eux. Il faut donc se rendre compte des travaux nécessaires pour atteindre la partie intacte du gîte, et des dépenses auxquelles leur exécution pourra donner lieu, dépenses qu'il faudra exagérer, pour ne pas s'exposer à la nécessité d'y renoncer, faute de capitaux, avant leur achèvement. Enfin il ne faudra pas perdre de vue, que le résultat de tous ces travaux sera encore bien incertain, parce que le gîte a pu s'appauvrir dans la profondeur, comme aussi il peut avoir conservé sa richesse ou même s'être enrichi. Il n'y a à cet égard, ainsi que nous l'avons dit précédemment, d'autre règle que la similitude ordinaire entre la manière d'être de tous les filons parallèles d'un même district.

Les travaux à faire pour atteindre le gîte, au dessous des vieux travaux, consisteront habituellement, si les anciennes exploitations sont déjà profondes, dans le creusement d'un puits vertical, sur lequel il faudra installer une machine suffisamment puissante pour l'épuisement des eaux. Comme leur abondance sera généralement incertaine, on sera obligé de fixer, d'après des données très-vagues, la puissance de l'appareil moteur. S'il consiste dans une roue hydraulique, il faudra donner à celle-ci les dimensions nécessaires pour qu'elle puisse au besoin utiliser la totalité de l'eau motrice dont on peut disposer. Si l'on établit une machine à vapeur, il sera convenable de faire choix d'une machine à simple effet, analogue à celles qui sont employées pour l'épuisement des eaux dans les mines de cuivre et d'étain du comté de Cornwall, en Angleterre. Il n'y aura guère alors d'autre inconvénient à augmenter sa puissance, que l'augmentation du prix d'achat de l'appareil : car ces machines sont disposées, ainsi qu'on le verra par la suite, de manière à pouvoir agir avec plus ou moins de puissance, suivant le volume d'eaux à extraire dans un temps donné, en dépensant une quantité de combustible qui demeure à peu près proportionnelle

Digitized by Google

au travail qu'on leur fait faire, et qui est dans tous les cas inférieure, pour une même quantité de travail, à celle que consomment les meilleures machines connues.

Dans certains cas, on pourra utiliser les vieilles galeries d'écoulement, en les relevant sur les points où elles sont éboulées.

S'il s'agissait d'anciennes mines de houille, ou d'autres gisements en couches, la sonde pourrait aussi être employée, pour obtenir des notions assez précises sur l'épaisseur des couches, la profondeur où ont cessé les anciennes exploitations, et la nature des terrains à traverser pour les atteindre.

DU SONDAGE.

De la sonde.

La sonde est un instrument destiné à forer, dans des terrains quelconques, des trous d'un petit diamètre, qui sont moins coûteux que ne le seraient des puits ou galeries de dimensions suffisantes pour qu'un homme pût les parcourir. Le mineur s'en sert pour la recherche de gisements en couches, ou plus généralement pour l'exploration des terrains stratifiés; pour ouvrir dans l'intérieur des mines, de petites communications utiles à l'écoulement des eaux ou à la circulation de l'air d'un lieu dans un autre; pour éclairer sa marche dans les gîtes qu'il exploite, lorsqu'il craint de rencontrer des eaux remplissant d'anciens travaux ou des cavités naturelles.

L'agriculteur, l'architecte, l'ingénieur des ponts et chaussées peuvent en faire usage pour se procurer sur la nature du sol, jusqu'à des profondeurs médiocres, des notions utiles dans les travaux divers qu'ils ont à exécuter.

Elle est surtout usitée pour la recherche des eaux souterraines qui circulent dans certaines couches perméables ou fissurées, où elles sont maintenues par l'imperméabilité des couches supérieures. Quand la sonde a traversé celles-ci, les eaux s'élèvent aussitôt et viennent quelquefois jaillir au-dessus de la surface du sol. Les trous de sonde destinés à amener des eaux souterraines à la surface ou près de la surface, se nomment puits forés ou *puits artésiens*, du nom de la province de France où ils ont été pratiqués le plus anciennement. Ceux qui servent à un usage inverse, c'est-à-dire, à verser dans des couches perméables des eaux superficielles dont on est embarrassé, se nomment *puits absorbants* ou *boitouts*.

Enfin la sonde sert à forer les trous dans lesquels on place des pompes, pour l'exploitation du sel gemme par dissolution.

Composition d'une sonde. — Les parties essentielles d'une sonde ordinaire sont : la *tête* qui demeure toujours hors de terre et sert à la manœuvre; les *outils* qui attaquent la roche au fond du trou, ou sur ses parois quand on veut l'élargir, et les *tiges* qui réunissent les outils à la tête. Toutes ces pièces sont habituellement en fer forgé; les outils qui servent à attaquer le terrain sont aciérés et trempés. Depuis quelques années, on a remplacé avec succès, dans des sondages profonds, les tiges en fer par des tiges en bois.

La tête sert à suspendre la sonde à une corde ou chaîne qui est attachée à un levier, ou s'enroule sur une treuil. Elle doit être construite de façon qu'on puisse faire tourner la sonde, sans tordre la corde. De là la forme représentée *fig.* 1 *Pl. III* : A, anneau tournant par lequel la sonde est suspendue; B, œil destiné à recevoir un levier au moyen duquel on fait tourner la sonde. Il y a souvent deux œils tels que B, de manière qu'on puisse adapter à la tête deux leviers à angle droit. La tête de la sonde est habituellement courte et n'a guère que 0m,70 à 1m,00. Elle est terminée en bas par un emmanchement semblable à celui des tiges, qui sert à l'assembler avec la tige qui la suit.

Tiges de sonde en fer, et assemblages. — Les tiges en fer sont cylindriques, à huit pans, ou carrées. La meilleure forme est la forme carrée, parce qu'elle est moins chère, et qu'elle permet d'adapter des clefs ou tourne-à-gauche sur toute la hauteur de la pièce. Le calibre ou équarrissage des tiges dépend de la profondeur à laquelle on veut parvenir. Pour de petits sondages de 20m,00 environ de profondeur, sur un diamètre de 0m,06 à 0m,07, des tiges carrées de 0m,025 de côté suffisent. De 20 à 50m,00 de profondeur, les outils ayant 0m,08 à 0m,10 de diamètre, on donne aux tiges une section de 9 centimètres carrés, ou 3 centimètres de côté.

Pour une profondeur de 100 à 150 mètres, les tiges carrées ont 0m,035 de côté.

Enfin, pour les sondes qui forent à un très-grand diamètre, de 0m,14 à 0m,25, on a employé des tiges qui avaient jusqu'à 0m,042 ou 0m,045 de côté.

La longueur des tiges est ordinairement de 5 à 6 mètres; elles se terminent à leurs extrémités par un renflement, et par une partie qui sert à les assembler aux tiges contiguës, dont la forme varie avec le mode d'assemblage.

Indépendamment des tiges de la longueur normale de 5 à 6 mètres, il faut en avoir de plus courtes pour la commodité du travail.

Dans tous les cas les tiges doivent être parfaitement droites : les renflements aux nœuds d'assemblages doivent être d'un diamètre beaucoup plus petit que celui des outils, afin qu'ils ne s'engagent pas et qu'ils ne dégradent pas les parois du trou. Tous les assemblages doivent être pareils, afin qu'une tige quelconque puisse se placer entre deux autres.

Le mode d'assemblage le plus habituel et le plus commode est l'assemblage à vis à filets triangulaires. Chaque tige se termine, d'un côté par un pas de vis tracé sur un cylindre dont la section est au moins égale à la section de la tige elle-même, et au bas duquel est ménagée une embase, *fig. 2, Pl. III;* de l'autre côté par une douille dont la profondeur est exactement égale à la hauteur du cylindre portant la vis, afin que dans l'assemblage le bout de celui-ci porte sur le fond de la douille, en même temps que les bords de la douille portent sur l'embase qui est au bas du cylindre fileté. La douille est taraudée intérieurement de manière à former l'écrou du pas de vis. Les assemblages sont ajustés bien exactement et polis en dehors à la lime, ou tournés. Les vis peuvent aussi être à filets carrés ; elles sont alors faites au tour, et la douille est en général mal taraudée : les vis à filets aigus sont beaucoup plus faciles à faire, les filières et tarauds nécessaires pour cela se trouvant dans presque toutes les forges, et elles remplissent tout aussi bien le but que les vis à filets carrés. Leur usage est en conséquence beaucoup plus général.

Voici les dimension adoptées par M. Fantet pour les assemblages de tiges carrées de 0m,03 de côté, et des outils de 0m,08. La longueur de la vis est de 0m,05, avec huit pas de vis sur cette longueur : diamètre de la vis 0m,034 : embase 0m,01 : diamètre extérieur de la douille 0,054. Un pareil assemblage pèse 5 kil. à 5 kil. et demi, et coûte à peu près 9 francs.

M. Degousée emploie, pour des tiges carrées de 0m,025 de côté, des assemblages à vis à filets triangulaires des dimensions suivantes. La profondeur de la douille cylindriqne est de 0m,045. Le cylindre qui la remplit est fileté sur la moitié inférieure de la longueur contiguë à l'embase. Il porte six pas de vis. La *fig, 2, Pl. III*, représente cet emmanchement.

La rupture par des efforts de torsion, tend toujours à se faire à la naissance de la vis au-dessus de l'embase; il importe en conséquence de choisir pour la fabrication de ces assemblages, du fer d'excellente qualité; les assemblages sont forgés à part et soudés aux extrémités des tiges.

La tête de sonde est toujours terminée par une douille, et tous les outils portent un pas de vis, de sorte que toutes les douilles tournen leur ouverture vers le bas.

Les assemblages à vis ont l'inconvénient de ne se prêter qu'au mouvement de rotation dans un seul sens. Les assemblages dits à enfourchement, *fig.* 5, *Pl.* III, ou à manchons, se prêtent au contraire au mouvement de rotation dans les deux sens; mais ils ont d'autres inconvénients. Pour des tiges carrées de 0m,025, on donne à la fourche 0m,034 de large sur 0m,11 de long. Pour des tiges de 0m,032 à 0m,034, la fourche a 0m04 à 0m,045 de largeur sur 0m13 à 0m,14 de long. Enfin, pour des tiges de 0m,035 à 0m,40, on a des assemblages à 3 boulons. La fourche a 0m,045 à 0m,050 de large sur 0m22 de longueur. Ce mode d'assemblage est très-usité dans l'Artois. Il a des inconvénients assez graves, savoir : l'agrandissement des trous des boulons qui ballottent, le gauchissement des fourches, leur élargissement par l'effet des graviers qui se logent entre les surfaces en contact, le dévissage accidentel des écrous qui tombent quelquefois au fond du trou, la longueur du temps perdu pour assembler et désassembler.

On peut, au lieu de se servir d'un écrou que l'on ajuste sur la tête filetée du boulon, tarauder l'écrou dans une des branches de la fourche, et pratiquer dans l'autre branche une cavité où la tête du boulon se trouve noyée. On se sert alors, pour visser et dévisser les boulons, d'une fourche à deux pointes montée sur un manche de villebrequin; les pointes de la fourche sont enfoncées dans deux trous ménagés dans la tête du boulon, des deux côtés de son axe. Cette disposition a l'avantage d'abréger le temps du dévissage, de faire disparaître la saillie des têtes des boulons et des écrous, et enfin de supprimer ceux-ci. Elle a été adoptée par M. Mulot pour l'assemblage des tiges de la grande sonde dont il a fait usage, dans le percement du puits foré de l'abattoir de Grenelle.

Quoique les assemblages à vis ne permettent pas d'imprimer à la sonde des mouvements de rotation en sens contraires, ce qui pourrait être quelquefois très-utile, notamment pour dégager un outil qui est pris dans le terrain, l'expérience prouve qu'ils suffisent généralement à tous les besoins. On a proposé plusieurs moyens de rendre fixe l'assemblage à vis : on a traversé la vis et la douille par un boulon; on a placé sur l'assemblage façonné extérieurement à huit pans un manchon octogonal, ou sur l'assemblage arrondi, un manchon cylindrique fixé par une goupille logée à moitié dans le manchon et à moitié dans les deux parties de l'assemblage; enfin on a vissé sur l'assemblage un manchon en sens inverse de la douille. Tous ces moyens sont imparfaits, et présentent des inconvénients qu'il est facile d'apercevoir.

Quel que soit le mode d'assemblage, il est nécessaire, pour faciliter l'extraction de la sonde, que la partie supérieure de chaque tige présente, à une petite distance au-dessous du renflement formé par l'embase, une seconde saillie sous laquelle on puisse placer, pour tenir la tige suspendue, une clef de retenue ou tourne-à-gauche. On voit ces saillies en *a* et *a'*, *fig.* 2 et 3.

Des outils de la sonde.

Les outils de la sonde sont de formes diverses, suivant le degré de consistance et la nature des roches à traverser. Les uns servent à entailler le rocher, les autres à extraire les débris de roches broyées, d'autres à retirer du fond du trou des parties brisées de la sonde.

Trépans et ciseaux. — Les instruments qui servent à entailler la roche sont les ciseaux ou trépans. Les *fig.* 4, 5, 6 et 7, *Pl.* III, représentent ceux dont on fait habituellement usage. Le tranchant du trépan est droit, comme dans la *fig.* 4, ou courbe comme dans la *fig.* 5 ou à pointe et à double biseau comme dans la *fig.* 6. Cette dernière forme convient particulièrement dans les roches peu dures. Le tranchant des trépans est en outre en biseau dont l'angle est plus obtus, à mesure que les roches attaquées sont plus résistantes. Dans tous les cas le ciseau est aciéré fortement jusqu'à la moitié de sa hauteur qui est de $0^m,30$. Il est trempé à une température qui ne doit pas être trop élevée, parce que cela le rendrait cassant. Sa largeur doit dépasser de 4 à 5 millimètres le diamètre des outils cylindriques que l'on introduit pour enlever les débris et les boues amassées au fond du trou. Pour les sondages d'un grand diamètre, et surtout dans les roches dures, il est utile d'employer un trépan composé de deux parties, dont l'une, en avant de l'autre, et située au milieu de la largeur, fore, sur un diamètre plus petit, le trou qui est ensuite élargi à mesure qu'il s'approfondit. La *fig.* 7 représente un trépan de ce genre, vu de face. La partie *cd* est appelée le *tetton* par les sondeurs. Le trépan à tetton est ordinairement d'une seule pièce. Cependant, quand le diamètre est considérable, le tetton peut être construit à part et réuni au corps de l'outil par un enfourchement et des boulons.

Afin que le travail du sondage ne soit pas interrompu, il faut avoir au moins un trépan de rechange, et il est même indispensable, dans les terrains durs, d'en avoir plusieurs, pour remplacer ceux qui sont émoussés et qu'on renvoie à la force où ils sont rafraîchis et rechargés d'acier au besoin. On doit aussi avoir un calibre dans lequel on passe tous les trépans, avant de les descendre dans le trou, pour s'assurer

qu'ils ont conservé leur largeur normale. Si l'on ne prenait pas cette précaution, l'usure des bords latéraux de ces outils, qui est très-prompte dans les roches dures et quartzeuses, amènerait bientôt une diminution du diamètre du trou, qui donnerait lieu à de graves difficultés. Quand la sonde est armée du ciseau, on la soulève au moyen d'un câble auquel elle est suspendue, et on la laisse retomber. Pendant qu'elle est en l'air, des ouvriers appliqués aux leviers de la tête, la font tourner. Il est évidemment indispensable de tourner chaque fois qu'on fait battre l'instrument, afin de conserver au trou la forme cylindrique et de ne pas engager l'outil.

Trépans à oreilles de Kind. — M. Kind, sondeur allemand fort habile qui a exécuté avec succès des forages extrêmement difficiles, et entre autres celui de Cessingen, dans le grand-duché de Luxembourg, dont nous parlerons plus loin avec quelque détail, fait usage de trépans que l'on pourrait appeler *trépans à oreilles;* ils sont représentés par les *fig.* 8 et 9 de la *Pl. III.* Ces figures, ainsi que la description suivante, sont empruntées à l'ouvrage de Kind, intitulé : *Anleitung zum Abteufen der Bohrlocher*, etc., imprimé à Luxembourg, en 1842. A représente, dans les figures 8 et 9, le trépan vu de face dans une direction perpendiculaire à la longueur du tranchant. B représente le trépan vu de profil; C est le trépan vu en dessous; D, dans la *fig.* 8, est le trépan vu en dessus. E, E', dans la *fig.* 9, sont les dessins d'une pièce *en croix* qui se pose sur une embase ménagée à la partie supérieure du trépan, au-dessous de la vis d'assemblage. Cette pièce est maintenue par le bourrelet inférieur de la tige à laquelle se visse le trépan. Kind donne à la partie carrée de la tige du trépan une très-forte section, au moins 8 centimètres de côté, afin d'augmenter le poids et la rigidité de l'instrument. Le tranchant des trépans est, comme le montrent les deux figures, très-légèrement courbe. Sur les deux côtés latéraux sont deux tranchants transversaux, aciérés, courbés suivant la surface cylindrique qui a pour diamètre le tranchant longitudinal. Ces tranchants transversaux sont destinés à aléser le trou, à ne pas y laisser subsister d'aspérités. Ils empêchent aussi l'outil de s'engager dans des fissures du terrain. Les tranchants transversaux sont beaucoup plus courts dans la *fig.* 8 que dans la *fig.* 9. On se sert du trépan, *fig.* 8, dans les terrains tendres et tenaces à la manière des argiles. En raison de sa forme, il s'empâte moins facilement que le trépan *fig.* 9, dans lequel les tranchants transversaux ont plus de hauteur, et qui conserve toute son épaisseur vers le bas. Celui-ci est d'un bon usage dans les roches dures et quartzeuses, parce qu'il ne s'use pas aussi rapidement que le premier. Sur l'embase ménagée un

peu au-dessous du tenon portant le pas de vis, on pose la *croix* E, E′, *fig.* 9. Cette pièce est formée de deux ou quatre bras partant du carré central qui s'ajuste sur la partie *a* de la tige du trépan. Chaque bras se termine par un tranchant transversal tourné vers le bas. La *croix*, dont le diamètre est inférieur de 2 ou 3 millimètres à la largeur du trépan, a deux objets : elle sert de guide à l'outil qu'elle maintient dans la situation verticale; les tranchants servent en outre à aléser le trou, et font disparaître les dernières aspérités de la roche. Les bras de la croix et le carré ont une hauteur de 8 centimètres à peu près dans le sens vertical. La section de ces bras est en forme de lentille pour qu'ils ne gênent pas le mouvement de la sonde dans l'eau dont le trou est toujours rempli.

La *fig.* 10, *Pl. III*, représente l'alésoir, ou plutôt l'élargisseur dont Kind fait usage, et qu'il a décrit dans son ouvrage. Il consiste en une masse de fer arrondie ménagée à l'extrémité d'une tige carrée de même forme et de même force que celle d'un trépan. Cette masse arrondie est limitée en dessous par une surface légèrement concave de façon à ce que le contour soit tranchant. Quatre cannelures latérales laissent le passage libre à l'eau et aux boues qui remplissent le trou à élargir. A, *fig.* 10, est une projection verticale. C est une vue en dessous de cet outil qui remplace avec avantage les anciens trépans annulaires. On place la *croix* au sommet de la tige, comme pour les trépans, *fig.* 8 et 9. Cet instrument n'est employé par Kind que comme élargisseur, l'alésage des trous étant devenu tout à fait inutile, suivant lui, par l'emploi des trépans à oreilles.

Outils qui attaquent le terrain en tournant. — Les *fig.* 11 et 12 représentent deux outils dont on fait rarement usage, et que l'on appelle *langue de carpe* et *serpiat*. Les bords sont tranchants et recourbés comme l'indiquent les figures. Les deux pointes extrêmes sont un peu recourbées en forme d'écuelle, dans le premier instrument. Il faut que ces outils soient entièrement aciérés sur les bords; leur trempe doit être plus faible que celle du ciseau. On les enfonce en tournant. Ils ne peuvent s'employer que dans des terrains tendres, qui sont néanmoins un peu fragiles, tels que la craie, les calcaires tendres, les marnes; dans des argiles compactes, ils s'engageraient trop facilement.

Le trépan rubanné, *fig.* 14, est formé de 5 à 6 spires qui occupent une longueur d'environ $0^{m},50$. Il se termine, comme la langue de carpe, par deux languettes. Il est aciéré sur les bords et sert à désagréger des sables fins agglutinés; on l'enfonce en tournant. La lame

de fer dont il est formé doit avoir à peu près $0^m,02$ d'épaisseur au milieu.

Le trépan cannelé ou équarrissoir, *fig.* 15, est une pyramide quadrangulaire terminée par une pointe aciérée sur toutes ses arêtes. Cet équarrissoir est d'une réparation difficile, lorsque les arêtes sont émoussées. La *fig.* 16 représente un autre équarrissoir dont M. Degousée fait usage, et qu'il a décrit dans les *Annales des Mines*. Il consiste en une forte tige en fer, sur laquelle sont fixés deux disques en fer *a*, *b*, réunis entre eux par quatre barres carrées en fer aciéré. Ces barres sont bombées et attaquent les parois du trou par leurs arêtes. Un seul outil de ce modèle peut servir pour trois ou quatre diamètres différents : il suffit de changer les disques pour en substituer d'un autre diamètre. Quand les angles des barres sont usés, on démonte l'équarrissoir, et on passe les barres de fer à la forge, l'une après l'autre. L'emploi de tous ces équarrissoirs est inutile, quand on se sert des trépans à oreilles.

Outils servant à briser les silex ou cailloux. — La pointe obtuse ou *bonnet carré*, *fig.* 17, est un prisme à quatre faces terminé par une pyramide quadrangulaire très-obtuse.

Une cloche cylindrique creuse, à bords tranchants et aciérés, sert à couper des rognons de silex : on l'appelle cloche à silex ou trépan annulaire.

Élargisseurs. — Les instruments élargisseurs servent à agrandir le diamètre d'un trou de sonde, quand il en est besoin. Ces élargisseurs se construisent en fixant sur le contour d'un cylindre en fonte, ou en fer, dont le diamètre est un peu plus petit que celui du trou déjà exécuté, des lames au nombre de 4, 6 ou 8, disposées symétriquement autour de l'axe du cylindre dans des plans passant par l'axe, terminées inférieurement et latéralement par un tranchant aciéré. La *fig.* 18 représente un élargisseur semblable garni de quatre lames. Celles-ci sont fixées dans le noyau à queue d'aronde, appuyées à leur partie supérieure contre les rebords supérieurs des rainures ménagées dans le noyau, et retenues en bas par un disque et un écrou, ou une clavette fixée à l'extrémité de la tige. Cet élargisseur s'emploie en sonnant; on peut aussi l'employer en tournant ou en *rodant*, suivant l'expression des sondeurs, dans les terrains tendres, pourvu que l'on donne une petite inclinaison aux tranchants inférieurs des lames. Dans tous les cas les débris de la roche détachés par cet outil tombent au fond du trou. On ne va les y chercher avec une tarière ou un cylindre à soupape, que lorsqu'ils ont rempli le trou, jusqu'à la hauteur où arrive l'élargisseur. Les élargisseurs, *fig.* 18, peuvent servir, en

changeant les lames, pour divers diamètres. L'élargisseur de Kind, *fig.* 10, ne convient qu'à un seul diamètre; mais il a l'avantage d'une solidité parfaite.

Tarières, cuillers, cylindres à soupape. — Les instruments servant à enlever les débris et les boues du fond du trou, sont :

Les tarières, *fig.* 19 et 20, *Pl. III*, qui servent aussi dans le terreau, lorsqu'on commence un trou de sonde. Ces tarières sont faites à peu près comme celles des menuisiers. Elles ont de 0m,50 à 0m,60 de long et souvent davantage. Elles se terminent vers le bas, d'un côté par une mèche, et de l'autre par un onglet ou plan servant à retenir la *carotte*. La mèche doit avoir de 0m,02 à 0m,03 de saillie sur le plan; dans les tarières de 0m,08 de diamètre, l'écartement des bords est en haut de 0m,04, et dans le bas de 0m,06. Dans celles de 0m,09 de diamètre, l'écartement est en haut de 0m,03, et dans le bas de 0m,05. Le bord contigu à la mèche doit être aciéré.

Pour une tarière de 0m,60 de long et 0m,08 de diamètre, on prend un morceau de fer plat de 0m,16 de large sur 0m,015 d'épaisseur: on soude à une extrémité un ringard : on fend à la tranche un des bords et l'on introduit dans la fente un morceau d'acier façonné d'avance en forme de coin. On fend aussi l'extrémité opposée au ringard, pour y introduire de l'acier. On soude, l'on forge pour amincir les bords. On découpe ensuite vers le bas, et l'on courbe la feuille ainsi préparée sur un mandrin. Il faut que le bord taillant soit en saillie de 7½ à 8 millimètres sur l'autre. La mèche et le rebord se courbent facilement. Une pareille tarière doit conserver d'épaisseur au dos, après avoir passé de vingt à vingt-cinq fois au feu, environ 0m,01 ou 0m,02, sur 0m,45 de long et 0m,06 de diamètre; elle pèse 9k,50 environ, et coûte de 14 à 15 fr., quand on en fait plusieurs; si on n'en fait faire qu'une ou deux, elles reviennent à 24 ou 25 fr. (*Mémoire de M. Fantet*, publié dans les *Annales des Mines*).

La tarière peut être employée dans presque tous les terrains : elle sert à enlever les boues, et elle se remplit très-bien; les débris viennent former une carotte compacte et solide, pour peu qu'ils soient susceptibles de former avec l'eau une pâte de quelque consistance. Il en est ainsi dans les terrains de craie, dans tous les terrains calcaires, les gypses, les argiles, les schistes des terrains houillers, etc. Il est alors avantageux d'employer des tarières très-longues, ayant jusqu'à 1m,50 ou 2 mètres. Mais lorsque les débris sont uniquement sablonneux comme ceux des grès du terrain houiller, la tarière se remplit mal, et la carotte délayée par les eaux qui remplissent le trou, n'est

pleine que sur une hauteur de $0^m,20$ à $0^m,30$, quand elle arrive à la surface. Des tarières longues seraient alors inutiles.

La carotte est détachée à la surface du sol; c'est par elle que l'on reconnaît la nature des couches traversées.

La tarière *à glaise*, *fig.* 21, est faite en tôle épaisse de 2 1/2 à 3 millimètres. Elle n'a point de mèche, parce que la glaise y pénètre et s'y attache suffisamment bien sans cela.

Dans les sables qui n'ont qu'un faible degré d'agrégation, on remplace la mèche de la tarière ordinaire par un trépan rubanné, et l'on a ainsi, *fig.* 22, deux outils, dont l'un désagrége les sables, et dont l'autre les rapporte à la surface, quand ils sont susceptibles de se réagglutiner en faisant pâte avec l'eau.

Il est inutile d'ajouter que les tarières et tous les instruments analogues qui attaquent le terrain en *rodant*, doivent être conformés et tournés de manière à ce que l'action du terrain sur eux serre les assemblages à vis qui lient ces outils aux tiges et les tiges entre elles.

Le cylindre à soupape, *fig.* 23, est un cylindre en tôle de 1 à 2 millimètres d'épaissseur, brasé sur la longueur. On y adapte, par des rivets, une anse par laquelle il est lié aux tiges. Il est muni au fond d'une soupape à contre-poids, qui s'ouvre de dehors en dedans. Après s'être servi de la tarière, pour amener les débris solides, on fait descendre le cylindre à soupape, en l'attachant à l'extrémité d'une corde, ou en le fixant aux tiges. Le premier moyen est de beaucoup le plus expéditif. Après qu'on a soulevé et laissé retomber le cylindre deux ou trois fois, il se remplit de boues liquides que l'on ramène à la surface.

Kind fait uniquement usage du cylindre à soupape attaché à une corde, pour vider le trou de sonde, à l'exclusion des tarières qui ne sont pas même mentionnées dans son ouvrage. On peut joindre la tarière à la soupape, c'est-à-dire placer un cylindre au-dessus d'une tarière qui ne serait ouverte que sur une hauteur de 24 à 27 centimètres.

Les soupapes à boulet paraissent avoir un avantage marqué sur les autres genres de soupapes pour les instruments destinés à ramener des sables ou des boues liquides du fond des trous de sonde. La *fig.* 24 représente une cloche avec une soupape à boulet, telle que l'emploie M. Degousée. Dans les sables fluides on la descend au bout d'une corde, et elle se remplit par un mouvement de *pompage*. La *fig.* 25 représente la cloche employée dans les sables compactes. On la visse à l'extrémité des tiges, et on la remplit en *tournant*, ou en *battant*.

Elle ne diffère de la précédente que par la tige du boulet qui, en s'appuyant sur le fond du trou, force le boulet à se soulever. La *fig.* 26 représente un cylindre à soupape avec trépan rubanné, que l'on enfonce en tournant. Les sables désagrégés par le trépan entrent dans le cylindre, où ils sont retenus par le boulet qui retombe sur son siége, quand on relève la sonde pour la ramener au jour.

M. Mulot a employé, dans le sondage de l'abattoir de Grenelle, des cloches à soupapes à boulet, d'une très-grande longueur, formées de plusieurs parties vissées les unes au bout des autres, et dont chacune était terminée par un diaphragme plan percé d'un trou circulaire avec soupape à boulet, de manière à avoir ainsi jusqu'à trois ou quatre soupapes étagées sur la longueur totale de la cloche.

Indépendamment des outils précédents, il faut avoir des outils particuliers, pour tenir la sonde suspendue dans le trou, visser et dévisser les tiges, arracher les tiges cassées qui, après un accident, pourraient rester dans le trou.

Grappins, clefs de relevée, tourne-à-gauche. — Pour tenir la tige suspendue dans le trou, on la saisit au-dessous d'un nœud au moyen d'une clef de retenue *fig.* 28, *Pl. III.* On la suspend aussi au câble de l'engin au moyen d'une barre de fer recourbée appelée grappin, ou mieux d'un pied de bœuf ou clef de relevée. La *fig.* 27, représente la clef de relevée ou pied de bœuf vue de face et de côté : *a* est un anneau tournant, *b*, une cheville destinée à retenir la sonde en cas de choc, *c*, saillie qui sert à soutenir l'épaulement de la tige.

Pour désassembler les tiges, on se sert de tourne-à-gauche semblables aux clefs de retenue.

Pour suspendre la sonde au câble, on se sert d'un S en fer forgé *fig.* 29 dont une des extrémités est engagée dans l'anneau tournant de la tête de sonde, ou de la clef de relevée, tandis que l'autre passe dans une boucle du câble. Deux petits liens empêchent le décrochement que pourrait produire une secousse.

Pour tourner la sonde, on se sert quelquefois au lieu de barres plantées dans les œils de la tête d'un manche en bois garni de ferrures qui peut s'ajuster en une partie quelconque d'une tige carée. La *fig.* 32 représente le manche à vis, dont se sert M. Degousée. La tige se place en *a*; sur elle se ferme la charnière *b*, qui est maintenue par une chevillette traversant le piton *c* fixé au manche. Ensuite on serre la vis de pression *d*.

On se sert de curettes pour nettoyer les tarières.

Accrocheurs. — Les accrocheurs principaux sont : la *caracole*, la

cloche à écrou, le *tirre-bourre*, et des accrocheurs à pinces avec ou sans ressorts.

La caracole, *fig.* 31, est un crochet en fer recourbé dans un plan horizontal ou légèrement incliné à l'horizon. La tige de ce crochet, d'un mètre de longueur environ, et d'un équarissage un peu plus fort que celui des tiges, s'adapte au bas de celles-ci par l'emmanchement ordinaire. Le crochet est effilé à la pointe; il est ou arrondi, ou plus souvent méplat. Sa hauteur, dans ce dernier cas, est de 8 centimètres environ. A l'aide de la caracole, on peut saisir, au-dessous d'un nœud d'assemblage, une tige de sonde restée dans le trou, et la ramener au jour. Il faut pour cela que le carré de la tige puisse se loger dans le pli du crochet que l'on descend au-dessous du nœud; et que le nœud lui-même ne puisse pas y passer. Elle sert encore à ramener et à maintenir dans l'axe du trou une tige de sonde, ou la tige d'un outil qui s'est incliné vers la paroi, afin qu'on puisse coiffer cet outil avec la cloche à écrou ou un accrocheur à pinces. Enfin, lorsqu'une plus ou moins grande longueur de tiges assemblées entre elles par des emmanchements à vis est restée dans le trou, il est quelquefois nécessaire d'opérer le dévissage des tiges au fond du trou, pour les retirer par parties. On peut alors saisir avec la caracole la ligne des tiges, en un point situé au-dessous de l'assemblage que l'on veut dévisser, et maintenir la partie inférieure de cette ligne, pendant qu'on dévisse la tige supérieure que l'on a saisie avec un accrocheur à pinces. On fait d'ailleurs usage de caracoles ou crochets courbés de diverses manières, suivant la forme des pièces qne l'on veut saisir.

La cloche à écrou, *fig.* 13, est une cloche conique portant intérieurement un filet de vis aigu en acier trempé qui mord sur la tête d'un tige restée dans le trou, et que l'on ne peut saisir avec la caracole, parce que la rupture a eu lieu à une grande distance d'un nœud d'assemblage. Lorsque la pièce que l'on veut saisir est couchée contre les parois du trou, on adapte au pourtour inférieur de la cloche un entonnoir en tôle, *fig.* 13, B, afin de coiffer plus facilement cette pièce. Quand la cloche est adaptée à une sonde dont les emmanchements sont à vis, le filet de celle-ci doit serpenter en sens inverse des filets des emmanchements, afin que les tiges de la sonde ne se dévissent pas lorsqu'on cherche à faire mordre la cloche sur la pièce restée au fond du trou. Quand on a coiffé la pièce avec la cloche à écrou, il faut avoir soin de tourner lentement pour ménager le filet.

Le tire-bourre, *fig.* 30, peut agir sur une tige à la manière de la cloche à écrou, lorsque les spires sont tranchantes et aciérées à l'intérieur. Il est surtout employé avec avantage, pour retirer la corde du

cylindre à soupape, lorsqu'elle s'est rompue et qu'une partie est restée dans le trou avec la cloche. Ce tire-bourre sert aussi quelquefois à ramener des cailloux arrondis.

On a donné aux accrocheurs à pinces un grand nombre de formes différentes. Le meilleur accrocheur de ce genre est sans contredit celui qui a été imaginé par l'inspecteur des salines Oberster, et qui est représenté par les *fig.* 33 A et 33 B. Ces figures et la description suivante sont empruntées à l'ouvrage de Kind. Cet instrument consiste en un fort anneau en fer *a* évidé intérieurement en forme de tronc de cône ou d'entonnoir, lié à une fourche dont les deux branches opposées *b b*, ont une longueur de 1m,50 et 0m,014 environ d'équarrissage. Ces deux branches se réunissent au point *c* en une tige carrée *d*, de 0m,04 de côté qui est terminée par l'emmanchement à vis ordinaire. Sur la tige carrée est enfilé un coulant à quatre faces *e*, qui peut monter et descendre le long de cette tige depuis la bifurcation *c* jusqu'à un goujon *h* qui traverse la tige. Au coulant *e* sont suspendues par des retours en équerre *gg* les deux branches *ff* de la pince, dont les extrémités inférieures sont encore engagées dans l'anneau *a*, lorsque le coulant *e* vient toucher le goujon *h* qui limite son excursion. La *fig.* 33 A fait voir la forme des branches de la pince ; elles sont dentelées et aciérées intérieurement. On voit clairement que ces deux branches mobiles autour de leur extrémité supérieure par laquelle elles sont suspendues au coulant *e*, se rapprochent en s'enfonçant dans l'intérieur de l'anneau *a*, lorsque le coulant descend. *k*, est un crochet recourbé comme la caracole, fixé sur l'anneau *a* et l'une des branches *b* de la fourche, lequel sert au besoin à ramener dans la position verticale et dans l'axe du trou la tige qu'il faut coiffer avec l'anneau inférieur *a*. Pour se servir de cet accrocheur, on le visse au bas de la ligne de tiges. On repousse le coulant *e* contre le goujon d'arrêt *h*, on écarte avec la main les mâchoires dentelées des pinces, et on les maintient ainsi écartées par un petit étai en bois que l'on loge dans la denture ; l'on descend la sonde. Quand on est parvenu à coiffer avec l'anneau *a* la partie supérieure de la tige ou de la pièce rompue, celle-ci pénètre entre les mâchoires, repousse l'étai de bois qui tombe. Le coulant *e* et les branches de la pince descendent par leur propre poids, jusqu'à ce que les mâchoires dentelées viennent s'appliquer sur la pièce. Les dents sont serrées sur elle par suite de la forme extérieure des pinces qui s'introduisent, à la manière d'un coin, entre l'anneau et la pièce. Quand on relève ensuite la sonde, ces mâchoires serrent d'autant plus que le système des pinces est tiré vers le bas par le poids et la résistance de la pièce que l'on veut relever.

L'accrocheur à pinces décrit par Kind est construit de manière à pouvoir saisir des pièces de fer qui auraient depuis 3 pouces et demi (0m,09) de côté jusqu'à la grosseur du doigt. Cet instrument remplace avec avantage la cloche à écrou, et tous les autres accrocheurs à pinces avec ou sans ressorts. La caracole simple, le tire-bourre et l'accrocheur à pinces ci-dessus sont les seuls outils accrocheurs dont Kind fasse usage dans sa pratique. Il ne se sert guère du tire-bourre que dans le cas de rupture de la corde du cylindre à soupape.

Uniformité du calibre des outils. Rectitude des tiges. — Les sondeurs ont encore quelques autres outils : nous les décrirons, ainsi que les tiges en bois, après avoir fait connaître la manœuvre de la sonde. Nous terminerons cet article en insistant de nouveau sur l'importance de l'uniformité de calibre des trépans employés dans un sondage. Les tarières et cylindres à soupape doivent passer avec un peu de jeu dans une lunette ou calibre qui est exactement rempli par les trépans.

Les tiges doivent être parfaitement droites; pour s'assurer de leur rectitude, le meilleur moyen est de les suspendre par la partie supérieure à la corde d'un engin et d'examiner avec le fil à plomb si elles sont bien verticales. On assemble les tiges deux à deux en alternant les tiges avec une seule, et l'on voit si l'ensemble de deux tiges a son axe exactement en ligne droite. Cette méthode est préférable à celle qui consiste à assembler toutes les parties de la sonde et à les étendre sur le sol.

Manœuvre de la sonde et engins employés.

Commencement du sondage. — On commence d'abord par percer dans un madrier très-épais ou une solive, un trou circulaire ayant les dimensions des outils de la sonde, avec un peu de jeu. On loge ce madrier dans le sol à l'endroit où l'on veut forer. Il est destiné à empêcher les éboulements superficiels de terre. On ajuste ensuite la tarière à la tête de l'outil, et l'on agit en tournant au moyen d'une barre placée dans l'œil de la tête, ou du manche représenté *fig.* 32. Il faut avoir bien soin, dans le commencement, de maintenir l'outil bien vertical, et quelquefois on le dirige au moyen d'un arbre foré, de 1 à 2 mètres de longueur qu'on plante dans le sol. Lorsque le trou commence à s'approfondir, il est bon d'adapter à la pièce de bois dans laquelle est foré l'orifice, deux feuilles de tôle épaisses tournant autour de charnières horizontales, qui se rabattent sur l'orifice du trou de sonde qu'elles recouvrent. Les deux feuilles de tôle portent sur leurs bords en regard des échancrures demi-circulaires, dont le centre cor-

respond à l'axe du trou, et d'un diamètre suffisant pour laisser passer librement les tiges, sans laisser passer les nœuds des assemblages. Cette petite trappe se lève, quand on relève la sonde, et sert à prévenir la chute de petits objets au fond du trou, pendant la manœuvre ordinaire. La tarière ouverte suffit pour percer la terre végétale et les argiles sans cailloux. On la retire quand elle est remplie, et on enlève les carottes. Ce premier forage va très-vite et n'occupe que deux hommes. Quand on est au roc, il faut substituer à la tarière un autre outil capable de broyer le rocher. C'est ordinairement le ciseau plus ou moins obtus. On soulève la sonde et on la fait battre, en tournant chaque fois de 1/5 ou de 1/6 de circonférence. Quand le trou est sec, on y jette de l'eau pour rafraîchir les outils qui se détremperaient en s'échauffant. Après avoir battu avec le ciseau, on enlève les débris au moyen de la tarière. Dès que l'on est ainsi arrivé à une profondeur de 8 à 10 mètres, deux hommes ont beaucoup de peine à soulever la sonde, et il faut avoir recours à un engin. Si le trou qu'on se propose de faire ne doit pas être très-profond, on pourra se servir d'une simple chèvre de maçon fixée par trois cordes ou haubans; on placera sur le tour de la chèvre une corde qui ira se plier sur la poulie et à laquelle on suspendra la tête de la sonde. On aura soin de placer l'axe de la corde pendante dans le prolongement de l'axe du trou.

Si au contraire le trou doit arriver à une profondeur assez considérable, il voudra mieux employer un engin plus commode et qui est ordinairement formé de trois montants pour les sondages d'une profondeur médiocre, 100 à 150 mètres, et de quatre montants, pour les sondages plus profonds.

Chèvres ou engins à trois montants. — Les *fig.* 1, 2 et 3, *Pl. IV*, représentent une chèvre à trois montants, de 17 à 18 mètres de hauteur, avec tous ses accessoires. La *fig.* 4 est le sommet d'un engin à quatre montants, avec une poulie mouflée. Les *fig.* 5 A et 5 B représentent l'engin décrit et employé par Kind, pour les soudages d'une profondeur médiocre.

On distingue dans les *fig.* 1 et 2, *Pl. IV*, *a*, support du levier qui sert à soulever la sonde, pour le battage, quand elle est armée d'un trépan, ou outil analogue qui attaque le terrain par percussion;

b, levier pour le battage, terminé par un secteur circulaire sur lequel se plie la chaîne *d*, ou un câble qui soutient la sonde, et qui est amarré au crochet *k* placé au haut du secteur; *c*, treuil à manivelle servant à retirer la sonde du trou; *p*, poulie de renvoi placée à la partie supérieure de l'engin. *p'*, poulie mouflée, à la chappe de laquelle on suspend la sonde, quand elle a un poids trop considérable,

pour que les hommes de service aux manivelles du treuil puissent la soulever directement.

e, corde d'une longueur un peu plus grande que la hauteur de l'engin, servant à faire redescendre la poulie mouflée, ou le crochet qui termine le câble de relevée, lorsqu'il est arrivé au haut de l'engin, et que l'on a désassemblé la portion de tiges extraite du trou.

t, tiges extraites du trou, désassemblées par parties de 15 mètres environ de longueur, appuyées contre les échelons du troisième montant de l'engin.

Mm, fortes tringles en fer servant à régler l'écartement du montant garni d'échelons.

T, *fig.* 1, cabestan vertical, auquel on peut atteler un cheval, et dont on se sert seulement, dans les sondages très-profonds, exécutés sur un grand diamètre; dans les sondages ordinaires, le treuil à manivelles *c* suffit.

s, poulie de renvoi qui est nécessaire, lorsque l'on se sert du cabestan vertical.

La *fig*, 3 représente la tête d'un engin à 3 montants semblable à celui des figures 1 et 2, sauf qu'il porte deux poulies de renvoi au lieu d'une. Au moyen de deux poulies et de deux câbles de relevée allant s'envelopper en sens inverse, sur le même tour horizontal ou vertical, on évite, dans les grands sondages, la perte du temps qui serait employé à faire redescendre du haut de l'engin le crochet de la poulie mouflée ou du câble, ou plutôt le grappin destiné à saisir la partie supérieure des tiges restant encore dans le trou, parce que l'un des grappins redescend, pendant que l'autre s'élève en relevant les tiges.

La chèvre à trois montants de la *Pl.* IV, est, comme on voit, très-commode, en ce qu'elle peut être assemblée et installée en peu de temps, et qu'elle peut aussi être démontée très-rapidement, en ôtant un petit nombre de chevilles et de clavettes; mais elle est moins stable que la chèvre à quatre montants employée ordinairement par M. Degousée et qui est représentée *Pl. V*.

Engin à quatre montants et treuil à cames de M. Degousée. — La *fig.* 1 représente l'ensemble de l'engin, du levier pour le battage et du treuil à cames, qui sert à la fois à battre, et à relever la sonde. Un système de trois cames *a*, *a*, *a*, *fig.* 4, fixé sur l'axe du tour, sert à transmettre au levier *l*, *fig.* 1, le mouvement alternatif nécessaire au battage, au moyen de la tringle *b*, et de la barre en fer *c*, qui tourne autour d'un axe fixe placé en *d*.

Les *fig.* 3, 4 et 5 représentent sur une plus grande échelle le treuil

Digitized by Google

à cames ; F, F' sont les deux flasques en fonte, T le tour sur lequel s'enroule le câble de relevée ; *a*, *a*, *a*, les cames ajustées sur le même arbre ; R, roue dentée, engrenant avec le pignon *p*, monté sur l'axe des manivelles M, M ; *i*, *i*, roues à rochet, dont les dents sont tournées en sens inverses, et sur lesquelles on abat la griffe *xx* fixée à la barre supérieure *y*, quand on veut prévenir le mouvement du tour en arrière ; *h*, roue en bois, sur le contour de laquelle presse le frein *k* que l'on serre au moyen du levier *l*, *fig.* 5 ; *q*, patte que l'on rabat sur l'axe des manivelles et du pignon, entre la flasque F et l'épaulement *z*, prévenir le glissement longitudinal de cet axe et maintenir le pignon en prise avec la roue. Lorsque l'on veut débrayer, il suffit de relever la patte *q*, et de faire couler l'axe du pignon sur ses paliers, vers la flasque F ; le pignon se trouve ainsi écarté de la roue. Au pignon *p*, qui occupe la totalité de l'intervalle qui se trouve entre le contour de la roue dentée R et la barre supérieure *y*, on peut substituer des pignons de rechange d'un plus petit diamètre, quand la sonde devient plus pesante. Il suffit pour cela de dévisser les écrous *v*, *v'*, *fig.* 4 et 5, d'enlever les chapeaux *d* placés sur les deux flasques, après quoi on peut ôter la barre *y*, l'arbre du pignon et toutes les pièces en bronze qui supportent la barre *y* et l'arbre du pignon, lesquelles remplissent les fentes longitudinales ménagées au sommet des flasques. En changeant simplement l'ordre de superposition de ces pièces, on abaisse les paliers de l'arbre du pignon et des manivelles, d'une quantité égale à la différence des rayons du pignon actuel et du pignon plus petit qu'on lui substitue.

Petit engin de Kind. — Les *fig.* 5A et 5B, *Pl. IV*, représentent les projections sur deux plans verticaux rectangulaires de l'engin très-simple à quatre montants, dont Kind s'est servi pour les trous de sonde nombreux qu'il a forés dans les environs de Weimar, et dont le plus profond, celui d'Ettelbrück a été poussé jusqu'à 84 mètres. *a*, *a*, *a*, *a*, sont quatre montants en bois de 8 mètres de long, de 0m,13 à 0m,14 d'équarrissage en bas, et 0m,095 à 0m,11 en haut. Ils sont fixés sur des semelles *b*, *b* de 0m,14 à 0m,16 d'équarrissage, formant un carré de 3m,20 de côté dans œuvre ; en haut ils sont reliés par quatre autres pièces de bois *cc*, de 0m,11 d'équarrissage, assemblées en un carré de 1m de côté dans œuvre, et dont le centre est sur la verticale passant par le centre du carré inférieur, les montants sont consolidés par des entretoises *d*, *d*, *d*, de 0m,08 d'équarrissage, sur lesquelles on pose quelques planches formant de petits planchers amovibles, pour que la manœuvre de l'accrochage et du dévissage des tiges puisse se faire à une hauteur quelconque. Les deux entretoises inférieures opposées *ee*,

qui portent les tourillons du treuil à manivelles *ff*, sont à 1 mètre au-dessus du sol, elles ont $0^m,14$ d'équarrissage; le tour *FF* sur lequel s'enveloppent les cordes qui servent l'une à relever la sonde, l'autre à descendre et remonter le cylindre à soupape, a de $0^m,22$ à $0^m,27$ de diamètre, il porte deux manivelles *hh*. Quand le trou de sonde est arrivé à la profondeur de 30 mètres environ, le poids de la sonde devient trop fort pour qu'il soit possible de la relever à l'aide des manivelles, on agit sur le treuil par des barres *i*, *i*. Au sommet de l'échafaudage est établie la poulie de renvoi *k*, sur laquelle passe le câble qui sert à relever la sonde; l'essieu de cette poulie porte sur deux traverses *l*, *l* posées sur les pièces *x*, *x* du cadre supérieur.

Quand le trou de sonde ne doit avoir que 10 à 20 mètres de profondeur, on se sert de la même corde pour relever la sonde et pour descendre le cylindre à soupape qui sert à nettoyer le trou. Pour les trous plus profonds on a deux cordes distinctes; celle qui sert à relever la sonde est terminée à son extrémité par une boucle ou anneau que l'on passe dans un crochet fixé sur la circonférence du tour. Lorsque l'on veut nettoyer le trou avec le cylindre à soupape, on détache du tour la corde de la sonde, et on l'ôte en même temps de la gorge de la poulie *k*. La corde du cylindre à soupape qui est enveloppée sur le même tour est placée sur la poulie; elle porte à son extrémité libre un étrier ou chappe à boulon mobile, terminé par une douille à écrou dans laquelle on visse la tige en fer du cylindre à soupape. Quand les boues sont enlevées, on détache le cylindre de la corde, et on enveloppe celle-ci sur le tour, puis on remet en place la corde de la sonde. Lorsque le trou n'a qu'une petite profondeur, on gagne du temps en descendant et remontant directement à bras d'homme, sans l'intermédiaire du treuil, le cylindre à soupape.

Le levier de battage *mm*, *fig.* 5A, est élevé à un mètre au-dessus du sol; il est compris entre des poteaux de bois *nn*, qui sont posés sur une petite semelle et liés à leur sommet à une entretoise; il est porté par un essieu en fer qui traverse les deux poteaux: sa longueur est de 3 mètres, savoir 2 mètres depuis le point d'appui jusqu'à l'extrémité *p*, où est adaptée une barre transversale sur laquelle agissent les ouvriers pour soulever la sonde, et 1 mètre depuis ce même point jusqu'à l'autre bout où est adapté le crochet auquel la sonde est suspendue par une chaîne en fer à anneaux ronds; on peut très-facilement raccourcir ou allonger au besoin la portion de cette chaîne comprise entre le crochet et la tête de sonde.

Quand la sonde soulevée par les hommes retombe en vertu de son poids, l'excursion du levier *m* est limitée, parce que son extrémité *p*

Digitized by Google

vient frapper l'extrémité d'une pièce de bois *r* faisant ressort, et qui est appelée en allemand *Schlagfeder*. La pièce *r* est en bois très-sain et tenace, de 0m,14 à 0m,16 d'équarrissage et de 4 mètres à 4m,50 de long, elle est comprise depuis son extrémité postérieure jusques un peu en deçà de son milieu entre quatre montants verticaux *ss*, de 0m,16 d'équarrissage. Ces montants sont posés, assemblés à queue d'hironde et solidement coincés sur des semelles, afin qu'ils ne soient point arrachés par les chocs. Les semelles, ainsi que les pieds des montants, sont enterrés à 0m,60 ou 1 mètre de profondeur dans le sol, et recouverts de terre fortement damée. Les semelles et les pieds des montants antérieurs sont même pris dans de la maçonnerie, pour que les chocs ne puissent pas les ébranler; la queue de la pièce *r*, dans l'intervalle des deux montants antérieurs, passe en dessous d'une pièce de bois ou entretoise, et en dessus d'un boulon en fer qui traversent l'un et l'autre (l'entretoise et le boulon) les deux montants. Dans l'intervalle des deux montants postérieurs, la pièce *r* est traversée par un boulon en fer, ce qui l'empêche de prendre un mouvement longitudinal; elle repose sur un autre boulon en fer, qui l'empêche de se fendre par l'effet des chocs.

Grand engin de Kind, avec roue à marches. — Pour les sondages d'une grande profondeur, Kind fait usage d'un engin beaucoup plus élevé que le précédent, et se sert pour relever la sonde d'une roue à marches, *Tretrad*, au lieu d'un treuil à manivelles; il conserve d'ailleurs le levier de battage et le ressort en bois contre lequel vient frapper l'extrémité du levier après la chute de la sonde. Les *fig.* 1, 2 et 3, *Pl. VI*, représentent ce grand engin. Les montants principaux ont 20 mètres de long; à la hauteur de l'engin s'ajoute encore la profondeur d'un petit puits que l'on creuse dans les terres meules et même les premières couches de la roche, ce qui permet de désassembler les tiges par parties de 25 à 30 mètres de longueur. Les montants ont de 0m,30 à 0m,32 d'équarrissage au gros bout, et de 0m,19 à 0m22 au petit bout; ils supportent une petite tour dans l'intérieur de laquelle sont établies deux poulies de renvoi pour chacun des deux câbles qui servent à relever la sonde. Des planchers sont établis sur les entretoises *hh*, pour qu'on puisse saisir les tiges à toute hauteur; on arrive à ces planchers par des échelles inclinées. La roue à marches RR, est couverte par un appentis adossé à la face large de l'engin; l'espace qui se trouve au delà de la roue, le long de cette même face, est couvert par le prolongement de cet appentis, et une petite forge y est établie en *s*. Le levier de battage *ff* est établi sur une charpente indépendante de celle de l'engin, afin que celui-ci ne soit point ébranlée

par les chocs. Les quatre montants verticaux *bb* sont assemblés à queue d'hironde et fortement coincés dans les semelles transversales *aa*, *fig.* 1, dont la longueur est égale à l'intervalle des deux longues pièces parallèles sur lesquelles sont posées les quatre grandes colonnes MM.; ces montants sont maintenus en outre par des arcs-boutants *cc*. *dd* sont deux fortes ancres en fer qui relient la partie supérieure de la charpente à une pièce de bois enterrée dans le sol, où elle est solidement maintenue par de la maçonnerie ou des pieux. L'essieu *g* du levier porte sur les deux traverses horizontales *e*. Le levier est une pièce de sapin de 0^m,19 d'épaisseur et 0^m,24 de hauteur; il joue librement, mais sans un trop grand vide, entre les poteaux verticaux. *kk* est la barre transversale sur laquelle agissent les ouvriers; *i* le crochet d'attache de la chaîne en fer de la sonde : celle-ci est élevée à chaque coup d'environ 0^m,68. Le ressort en bois *l* ne doit être ni trop mou, ni trop roide; sa roideur doit être proportionnée au poids de la sonde; il est formé de plusieurs planches de 0^m,05 à 0^m,08 d'épaisseur superposées, et de longueurs inégales, ainsi que l'indique la figure. On fait varier la roideur du ressort, en augmentant ou diminuant le nombre des planches; aux points où le choc a lieu, le levier et le ressort sont armés de blocs en bois dur *mm*.

La roue à marches, qui sert à relever et à redescendre la sonde, est composée de deux couronnes entre lesquelles sont fixées les marches; celles-ci sont des planchettes de 0^m,16 de large et 0^m,065 d'épaisseur : elles sont placées à 0^m,65 d'intervalle mesuré suivant la circonférence, en saillie de 0^m,05 en dedans, et de 0^m,08 en dehors sur le fond cylindrique du tambour, afin que les ouvriers puissent facilement y placer leurs pieds. En dessous de la roue sont les coussinets *rr* fixés sur deux poutres parallèles pour servir de frein; ces poutres fixées par une de leurs extrémités sont reliées à l'extrémité opposée par une traverse horizontale *t* au milieu de laquelle s'accroche une tige verticale *q* articulée avec un levier horizontal L; quand on appuie sur l'extrémité de celui-ci, les coussinets du frein s'appliquent contre la circonférence de la roue; pendant qu'on relève ou qu'on descend la sonde, un ouvrier est toujours au frein, prêt à arrêter la roue au moindre accident.

Sur l'arbre de la roue sont fixées l'une à côté de l'autre deux paires de disques *jj*, formant deux bobines accouplées, sur lesquelles s'enveloppent en sens inverse l'une de l'autre les deux cordes plates qui vont passer sur les poulies *pp* établies au haut de l'engin, et servent à relever et descendre la sonde; *o* est le treuil à manivelles sur lequel s'enveloppe la corde du cylindre à soupape, qui se plie sur la poulie de renvoi *y* portée sur une petite charpente particulière.

Roue à marches avec cames ou lanterne pour le battage. — Dans le forage très-profond que Kind a exécuté à Cessingen, la disposition générale de l'engin était à peu près la même que la précédente, mais la roue à marches servait non-seulement à relever et à redescendre la sonde dans le trou, mais encore à la soulever, pour broyer la roche en *battant*. Les dispositions du levier de battage, du ressort en bois et de la roue adoptées à Cessingen, sont représentées dans la *fig.* 1, *Pl. VII*. La roue à marches avait 5m,10 de diamètre et 2m,50 de largeur dans œuvre. Six hommes pouvaient se placer en dedans et autant en dehors de la roue; le levier de la sonde était soulevé par quatre rouleaux ajustés entre deux disques parallèles disposés comme ceux d'une lanterne: ces rouleaux étaient mobiles autour de leurs axes, afin de diminuer le frottement. Le ressort formé de planches superposées était placé en dessous du levier; la levée de la sonde pouvait être portée jusqu'à 0m,50; la sonde était suspendue au levier par l'étrier à vis *e*, ce qui permettait d'augmenter la longueur des tiges au fur et à mesure que le trou s'approfondissait. La figure suppléera à une explication plus détaillée (1).

Manœuvre ordinaire de la sonde et accidents. — La manœuvre ordinaire de la sonde consiste dans la série d'opérations suivantes :

1° Attaque du terrain par des outils appropriés, qui sont généralement les trépans ou ciseaux pour les terrains durs; les tarières, la langue de carpe et le serpiat pour les terrains tendres; le trépan rubané pour les terrains sablonneux qu'il faut désagréger. Avec les trépans, on broie le rocher par un mouvement de percussion ou de sonnette, qui consiste à soulever l'outil et toute la sonde à une hauteur variable depuis 0m,15 jusqu'à 0m,70, suivant les circonstances, et à les laisser retomber en même temps qu'on fait tourner la sonde sur son axe, d'une petite quantité pendant la chute. Avec les tarières et le trépan rubané, les tire-bourres qui servent quelquefois à extraire les cailloux, on laisse porter la sonde de tout son poids sur le fond du trou, et on agit en *rodant*, c'est-à-dire en imprimant un mouvement de rotation continu.

2° Relèvement et extraction de la sonde, par parties plus ou moins longues, dès que les débris de la roche sont assez abondants au fond du trou pour empêcher l'action des outils sur le ferme.

---

(1) Les figures et les descriptions des engins employés par Kind sont extraites de l'ouvrage de cet habile praticien : *Anleitung zum Abteufen der Bohrlöcher*.

Digitized by Google

3° Netloyage du trou, enlèvement des débris au moyen des tarières ou cylindres à soupape.

Le sondeur doit, en outre, dans beaucoup de cas, prévenir l'éboulement des parois et le comblement du trou, en soutenant le terrain par des coffres ou des tubes de retenue. Enfin, il a à remédier à des accidents de diverses natures. Un outil peut s'engager dans le terrain sous un éboulement accidentel; les tiges peuvent rompre, sous la percussion, sous un trop grand effort de torsion; des corps durs étrangers peuvent tomber au fond du trou, etc.

Nous nous occuperons d'abord de la manœuvre ordinaire.

Diamètre initial d'un trou de sonde. — Le diamètre sur lequel on commence à forer un trou de sonde varie avec la profondeur, la nature du terrain à traverser, le but même du sondage.

Lorsqu'on a affaire à des terrains ébouleux, et que l'on prévoit que la profondeur du trou devra dépasser 200 mètres, il convient de commencer sur un diamètre qui ne soit pas inférieur à $0^{m},27$, et qui est généralement au-dessous de $0^{m},50$. La nécessité d'un grand diamètre initial, vient de ce qu'on peut être obligé, comme nous l'expliquerons plus tard, d'enfoncer plusieurs jeux de tubes de retenue, pour prévenir les éboulements. Or chaque colonne ou jeu de tubes diminue le diamètre du trou, qui doit conserver à la fin du sondage un diamètre de $0^{m},08$ à $0^{m},10$ au moins, si le forage a été entrepris pour obtenir des eaux jaillissantes, et de $0^{m},05$ à $0^{m},06$, si le forage a pour objet l'exploration du sol, comme dans le cas des recherches des mines.

Les forages pour recherches de couches de houilles ou autres explorations du sol, quand on est sûr d'ailleurs que le terrain à traverser ne sera point ébouleux, ne doivent jamais être entrepris sur un diamètre moindre que $0^{m},08$, pour peu qu'ils doivent atteindre une profondeur de plus de 50 mètres, et ce n'est que pour les sondages très-peu profonds, dans un terrain d'ailleurs non ébouleux, qu'on peut se contenter de trous d'un diamètre plus petit, comme $0^{m},05$ ou même $0^{m},027$. Il est d'ailleurs évident, qu'indépendamment de l'avantage d'un plus grand diamètre, sous le rapport de la possibilité de continuer le sondage jusqu'à une profondeur plus considérable, les débris retirés d'un trou plus grand procurent des notions plus exactes sur la nature des couches traversées.

On peut forer à bras jusqu'à une profondeur de 5 à 10 mètres, ce qui se fait habituellement en peu de temps et sans difficulté; dès qu'on est parvenu à cette profondeur, il convient d'installer l'engin qui servira jusqu'à la fin du sondage.

Digitized by Google

La sonde est alors suspendue par une corde au levier de battage quand elle doit agir par percussion, ou bien elle pèse librement sur le fond du trou, quand on agit, en *rodant*, par un mouvement de rotation continu.

Dans le battage, un nombre d'hommes suffisant sont employés à soulever la sonde, en même temps qu'un homme ou deux sont aux barres de la tête ou au manche de pression, *fig.* 32, *Pl. III*, pour la faire tourner d'une petite quantité à chaque percussion.

Extraction de la sonde. — Lorsque les outils ou le trou sont encombrés de débris, il faut relever la sonde; on la suspend par la tête au moyen du grappin ou clef de relevée, *fig.* 27 et 29, *Pl. III*, à l'extrémité du câble qui s'enroule sur le tour du treuil, roue ou cabestan. Les hommes agissant sur les manivelles, ou se plaçant sur les marches de la roue, relèvent la sonde de manière à amener au-dessus de la surface autant de nœuds d'assemblage que le permet la hauteur de l'engin. Un ouvrier place alors une clef de retenue, *fig.* 28, *Pl. III*, au-dessous de l'épaulement inférieur du nœud, et on laisse redescendre la sonde, dont la partie inférieure se trouve suspendue dans le trou par la clef de retenue posée sur ses bords. On dévisse, avec un tourne-à-gauche, la partie extraite du trou, que l'on détache du reste et que l'on appuie sur les traverses de l'engin, en ayant soin de faire reposer la douille inférieure sur une planche bien propre, ou sur le fond d'une auge disposée à cet effet. On fait redescendre le grappin qui est au haut de l'engin, en tirant sur la corde *e*, *fig.* 1, *Pl. IV*. On engage l'extrémité de la portion de sonde restée dans le trou, dans les mâchoires du grappin qui se place au-dessous de l'embase de l'emmanchement, et au-dessus de la clef de retenue, et on soulève une autre longueur de sonde égale à la première, que l'on désassemble de la même manière. On continue cette manœuvre jusqu'à ce que la totalité de la sonde soit extraite. Au lieu de suspendre la sonde dans le trou par une clef de retenue, on se sert souvent pour le même objet du manche à vis de pression *fig.* 32, *Pl III*, que l'on pose en travers du sol; on ouvre le fermoir *b*, pour relever la sonde, et on le referme au-dessous de l'épaulement pour tenir la sonde suspendue. Si l'instrument employé était une tarière, celle-ci arrive presque toujours remplie des débris du terrain qui forment dans son intérieur une masse compacte, dite *carotte*, que l'on détache avec des curettes.

Nettoyage du trou. — Si l'outil employé était un trépan, il faut d'abord extraire du trou les débris de la roche. Cette extraction peut s'opérer avec la tarière plus ou moins fermée, toutes les fois que les

Digitized by Google

débris de la roche sont susceptibles de faire avec l'eau dont le trou est toujours rempli jusqu'à une assez grande hauteur, une pâte de quelque consistance. On visse la tarière dont on veut faire usage à la place de l'outil que l'on vient d'extraire, et on redescend la sonde au fond du trou, en l'assemblant par parties par une manœuvre inverse de la précédente. Un ouvrier, monté au haut de l'engin, engage dans la clef de relevée ou grappin les tiges successives qui servent à prolonger la sonde. Quand une nouvelle longueur de tiges est vissée sur la partie de sonde qui reposait sur la clef de retenue, on bande le câble, on retire la clef de retenue, et on laisse descendre lentement, en s'opposant à bras, ou à l'aide du frein, à l'accroissement de vitesse que le poids des tiges tend à imprimer au système, etc.

La tarière étant arrivée sur le fond, on la remplit en rodant, et on la remonte comme on a remonté le trépan. Dans les terrains argileux ou même calcaires, il faut employer des tarières longues qui se remplissent complétement, pour vider le trou en un seul voyage.

Dans les terrains sablonneux, dont les débris ne font pas pâte avec l'eau, tels que certains grès houillers, une tarière longue ne se remplirait pas. On descend alors une tarière courte, et ensuite on est obligé de descendre le cylindre à soupape; on doit même commencer par là dans les terrains tout à fait sablonneux.

Les cylindres à soupape, *fig.* 23 ou *fig.* 24 et 25, *Pl. III*, peuvent être descendus en les vissant à l'extrémité des tiges; mais on peut aussi, et cela est plus expéditif, suspendre un cylindre à soupape terminé par une anse, comme celui de la *fig.* 24, à l'extrémité d'un câble qui s'enroule sur le treuil; on remplit ce cylindre en lui imprimant un mouvement d'oscillation, au milieu des débris délayés dans l'eau qui remplissent la partie inférieure du trou.

Journal de sondage et casier d'échantillons. — Le contre-maître, ou chef-ouvrier, place des échantillons des terrains ramenés des diverses profondeurs dans un casier numéroté, et inscrit sur le journal de sondage, la nature du terrain reconnu, avec renvoi aux échantillons du casier, ainsi que toutes les circonstances de l'opération.

Il est essentiel d'entrer à cet égard dans des détails minutieux qui peuvent servir, par la suite, à éclairer sur la nature du terrain, et même à faciliter la conduite ultérieure des travaux de sondage.

Dans des sondages de $0^m,08$ à $0^m,10$ de diamètre, il faut généralement, pour la manœuvre de la sonde de trois à huit ouvriers, suivant les profondeurs, entre 0 et 100 mètres. Au delà, on n'augmente

guère le nombre des ouvriers, mais le travail marche plus lentement.

Prix des sondages exécutés dans le terrain houiller. — Voici quelles ont été, d'après M. Fantet, les dépenses de deux sondages exécutés dans le terrain houiller des environs d'Autun, Saône-et-Loire, sur $0^{m},08$ de diamètre.

Dans le terrain houiller ordinaire, composé de couches alternatives de grès houiller médiocrement dur et de schistes houillers, les résultats ont été comme il suit :

PROFONDEURS.	NOMBRES d'ouvriers employés à la manœuvre,	NOMBRE de jours.	DÉPENSES de main-d'œuvre, la journée étant de 1 fr. 50 c.	
Mètres.			Fr.	C.
0 à 25	3	14	63	»
25 à 30	4	3	18	»
30 à 35	5	3	22	50
35 à 40	6	4	36	»
40 à 50	7	6	63	»
50 à 70	7	18	189	»
70 à 80	8	12	144	»
Totaux. . 80	»	60	535	50

Dans un terrain houiller très-dur, composé principalement de bancs de grès :

0 à 25	3	18	81	»
25 à 30	4	5	30	»
30 à 35	5	4	30	»
35 à 40	6	3	27	»
40 à 50	7	9	94	50
50 à 70	7	24	252	»
70 à 80	8	17	204	»
Totaux. . 80	»	80	718	50

A quoi il faut ajouter les gages d'un contremaître ou chef sondeur et les frais de réparation des outils.

Le prix d'une sonde de mine pouvant forer sur $0^m,08$ de diamètre, jusqu'à 160 mètres de profondeur, avec des tiges en fer carré de $0^m,035$ de côté, est établi comme il suit par M. Fantet :

	fr. c.
1 tête de sonde de $0^m,80$ de longueur, et du poids de 30 à 35 kil.	24 60
100 mètres courants de fer carré de $0^m,035$ de côté, et de très bonne qualité pour les tiges, pèseront 954 kil. et coûteront à raison de 80 fr. les 100 kil..	763 20
23 emmanchement à vis, à filets aigus, pesant 5 kil. à 5 kil. et demi chacun, et coûtant moyennement 10 fr. l'un. .	230 00
2 tarières.	50 00
4 trépans ou ciseaux.	48 00
4 clefs à dévisser, 2 grappins ou clefs de relevée, etc. .	42 00
1 accrocheur (cloche taraudée intérieurement).	56 00
	1,213 80
1 engin à 3 montants, de 5 mètres et un câble.	600 00
Total général. . . .	1,813 80

Les sondages dans des terrains solides, non ébouleux, coûtent plus ou moins cher, suivant la dureté des bancs à perforer; mais l'opération est rarement entravée par des accidents quand elle est faite avec les précautions nécessaires. Celles-ci consistent, en premier lieu, à donner à la partie supérieure du trou de sonde une direction bien exactement verticale, qu'il est ensuite assez facile de conserver. Les accidents ne peuvent guère provenir que d'un défaut d'attention et de soin dans la manœuvre, comme, par exemple, si l'on venait à rompre, en rodant, un outil qui rencontrerait un obstacle; si l'on désassemblait les tiges, en tournant au rebours, quand les emmanchements sont à vis; si, dans le relèvement ou la descente de la sonde, on laissait retomber au fond du trou la partie inférieure de la sonde, des morceaux de fer ou autres corps durs. D'ailleurs, quand le terrain est solide et le trou régulier, les accrocheurs divers que nous avons décrits, ramènent assez facilement à la surface les parties de sonde ou les corps étrangers qui seraient restés ou tombés dans le trou.

Terrains difficiles à perforer. — Les difficultés graves proviennent de la nature ébouleuse des parois du trou, de l'irrégularité de consistance et de structure des bancs que le sondeur doit traverser, d'une extrême dureté de la roche, ou d'une grande profondeur du trou. Les bancs de sables quelquefois tout à fait fluides; les couches de marnes ou d'argiles tendres, qui se resserrent sous la pression des assises supérieures et rétrécissent le trou; les masses dures en petits amas ou en

rognons, dans des couches tendres, comme par exemple les silex dans les terrains tertiaires d'eau douce et le terrain crétacé, les rognons de minerais de fer dans les couches de schistes du terrain houiller, etc., exigent l'emploi de moyens particuliers. Si ces terrains difficiles sont tout près de la surface du sol, s'ils ont une faible épaisseur et s'ils ne sont pas aquifères, il sera généralement préférable de les traverser par un puits vertical, au fond duquel on commencera le trou de sonde. Si ce puits a été poussé jusqu'à une profondeur de 18 à 20 mètres, et s'il n'y arrive point d'eau, on pourra remplacer l'engin de sondage par un simple treuil à manivelles installé sur le puits, ou par un cabestan vertical établi à une petite distance, et une poulie de renvoi ou molette placée au-dessus du puits. En tous cas, si l'on établit un engin ordinaire, la longueur de tiges qu'il sera possible de désassembler à la fois, sera augmenté de toute la profondeur du puits, ce qui procurera une économie de temps considérable, lorsque le sondage devra être poussé à une grande profondeur.

Glaisage du trou pour prévenir les éboulements. — Dans les trous de sonde peu profonds, d'un petit diamètre, de 0m,06 à 0m,08, destinés seulement à l'exploration du sous-sol, et qui, par conséquent, ne doivent pas être conservés longtemps, on parvient souvent à traverser des bancs ébouleux, et à consolider pour quelque temps les parois du trou, dans l'épaisseur de ces bancs, au moyen d'un simple glaisage. Quand on a traversé le banc ébouleux, sur une petite hauteur, on retire la sonde et l'on jette par la partie supérieure du trou des pelottes de glaise réduite en pâte très-consistante, en quantité suffisante pour remplir le trou jusques au-dessus du banc ébouleux. On tasse d'abord cette glaise avec une masse à tête plate, d'un diamètre un peu moindre que celui du trou, puis l'on fore dans la glaise tassée avec la tarière ordinaire, ou mieux la tarière à glaise, *fig.* 21, *Pl. III.* Il reste, après que le trou est vidé, un enduit glaiseux qui consolide les parois.

L'opération du glaisage est quelquefois exécutée avec moins de soin, en tournant simplement dans la partie du trou à paroi ébouleuse une tarière que l'on a remplie de glaise compacte. Quand le sondage doit être poussé très-profondément, ce moyen de consolidation serait insuffisant, et il faut avoir recours aux coffres ou tubes de retenue que l'on enfonce dans les bancs ébouleux.

Tubage des trous de sonde dans les terrains ébouleux. — On employait autrefois des coffres en bois carrés, armés par le bas d'un sabot en fer tranchant, que l'on enfonçait dans le terrain avec le mou-

ton d'une sonnette, à la manière des pieux. Aujourd'hui l'on emploie à peu près exclusivement des tubes circulaires en tôle, d'un diamètre extérieur un peu plus petit que celui du trou, et que l'on enfonce généralement en tournant; néanmoins, on leur donne une épaisseur de tôle assez forte, pour qu'on puisse frapper quelques coups de mouton sur leur tête, sans les écraser, quand ils sont retenus par un obstacle saillant ou par la pression latérale du terrain.

Tubes de retenue en tôle. Leur description. — Les *fig.* 1, 2, 3, et 4, *Pl. VIII*, représentent des tubes de retenue, le mode d'assemblage et les outils servant à la manœuvre. Les tubes doivent être en tôle de fer de première qualité, douce et sans gerçure. Leur épaisseur doit augmenter en même temps que leur diamètre. M. Degousée donne la suivante, pour déterminer les épaisseurs en raison du diamètre :

Pour $0^m,33$ de diamètre, l'épaisseur de la tôle est de	$0^m,003$.
$0^m,25$	$0^m,003$.
$0^m,15$	$0^m,002$.

On n'emploie guère de tubes de retenue d'un diamètre inférieur à $0^m,19$.

Les tubes sont confectionnés avec des feuilles de tôle de 2 mètres de longueur pliées à froid sur des rouleaux; la largeur du recouvrement est de 4 à 5 centimètres, et cette doublure est clouée avec des rivets en fer doux espacés de 4 à 5 centimètres, dont les têtes sont arrondies et aplaties en *gouttes de suif* intérieurement et extérieurement, afin de ménager l'espace, et de faire disparaître les saillies susceptibles d'accrocher soit les aspérités des parois du trou, soit les parties de la sonde.

Ils sont assemblés au moyen de frettes annulaires ou manchons en tôle, et de petits boulons à vis à tête aplatie, *fig.* 1 et 2. Il faut avoir soin, dans l'assemblage, de faire reposer les tuyaux exactement l'un sur l'autre, le manchon étant d'abord fixé avec des rivets, autour de l'extrémité du tube inférieur. Ce manchon et l'extrémité du tube supérieur, sont d'ailleurs percés d'une série circulaire de trous, qui se correspondent exactement et qui doivent recevoir les petits boulons à vis *b*, *fig.* 2. Pour l'assemblage, on place le tube inférieur, portant le manchon, dans une situation verticale, au-dessous de l'engin. On serre le tuyau supérieur dans le collier de manœuvre, *fig.* 3, et on le soulève en passant une corde dans les anneaux *dd*, ménagés à cet effet aux extrémités du diamètre du collier. On laisse descendre le tuyau supérieur dans la frette, on le tourne de manière à ce que les trous du tuyau correspondent à ceux du manchon ou frette. On dévisse l'écrou

e d'un boulon d'assemblage. On attache celui-ci à une petite ficelle par le crochet qui le termine, et on le laisse descendre dans l'intérieur du tube supérieur. Un homme placé en bas saisit la ficelle avec un petit crochet recourbé passé dans un des trous qui sont en regard sur le manchon et le tuyau, amène ainsi le crochet du boulon vis-à-vis de l'ouverture, et fait passer en dehors la partie de ce boulon, portant le filet de vis auquel il adapte l'écrou *e*. Après avoir vissé et serré les écrous jusqu'à refus, on coupe avec une scie la portion du boulon qui excède l'écrou, et l'on rive. Quand cette opération est terminée sur le contour entier, la jonction est parfaite et très-solide. Les tuyaux sont généralement assemblés dans l'atelier par trois, de manière à constituer des tronçons de 6 mètres de longueur, ce qui n'excède pas la hauteur des engins employés dans les sondages ordinaires.

Enfoncement des tubes de retenue. — Dès que le besoin de tuber le trou de sonde pour prévenir des éboulements, se fait sentir, on descend une colonne de tuyaux, dont le diamètre extérieur doit se rapprocher autant que possible du diamètre intérieur du trou ; souvent on passe l'équarrissoir dans la partie du trou que l'on veut soutenir, avant de commencer le tubage, afin de détruire les aspérités des parois qui s'opposeraient à l'enfoncement. Malgré ces précautions on ne peut guère laisser moins de 1 centimètre de jeu, entre le contour extérieur des tubes et le terrain, et l'on ne peut ensuite forer dans l'intérieur de la colonne qu'avec des outils dont le diamètre est inférieur de 2 centimètres au diamètre extérieur des tubes, de sorte que le diamètre du trou de sonde, au-dessous de la colonne, est diminué de 4 centimètres. On descend les tuyaux par parties de 6 mètres de longueur, que l'on assemble entre elles sur place, suivant la méthode décrite plus haut. On se sert d'un collier de suspension, formé de deux pièces de bois, serrées par des boulons à écrous, *fig.* 4, pour suspendre la portion de la colonne déjà engagée dans le trou, et qu'on laisse dépasser le sol d'un mètre de hauteur environ. Le collier de suspension est posé sur le terrain. On élève avec le câble de l'engin, le nouveau tronçon de 6 mètres que l'on veut ajouter, et qui est saisi, à la partie supérieure dans le collier de manœuvre, *fig.* 3, et l'on procède à l'assemblage au moyen des petits boulons à vis. Quand toute la colonne prolongée est ainsi suspendue au câble de l'engin, on enlève le collier de suspension, et on laisse descendre la colonne. Si elle est arrêtée par des obstacles, tels que des aspérités, des cailloux, on descend un des élargisseurs dont il sera parlé plus loin ; enfin, on frappe quelquefois avec précaution, de légers coups de mouton sur le haut de la colonne, préalablement recouverte d'un tampon de bois, pour préve-

nir la déformation de la partie supérieure du tuyau sous le choc du moulon.

Il convient de commencer le tubage, sans attendre les éboulemenls, dès que l'on s'aperçoit que les parois du trou manquent de solidité, ou qu'elles tendent à se resserrer. Ainsi on devra tuber dans les sables plus ou moins désagrégés, dans les marnes et les argiles coulantes ou qui se resserrent, dans les bancs contenant des rognons de silex, de fer carbonaté lithoïde, ou autres minéraux qui n'adhèrent pas à la masse de la roche, etc.

On continue le forage, au-dessous des tubes, ainsi que je l'ai déjà dit, sur un diamètre moindre de 2 centimètres que celui que les tubes ont à l'intérieur. Dans les bancs de sables désagrégés, de marnes ou d'argiles tendres, on pourra généralement faire suivre le tubage, c'est-à-dire prolonger la colonne, et l'enfoncer sur une assez grande hauteur, sans employer le secours des outils élargisseurs. Le tube inférieur s'enfoncera en coupant et détachant les parties du terrain qui sont au-dessous, et qui ne se seraient pas éboulées naturellement.

Outils élargisseurs de M. Degousée. — Si la consistance du terrain est trop forte pour permettre l'enfoncement, on devra recourir à l'emploi des outils élargisseurs, afin de détacher les portions de terrain qui s'opposent à la descente de la colonne de tubes. Il faut alors employer des outils qui puissent se développer lorsqu'ils sont parvenus au-dessous des tubes, et rentrer ensuite dans leur intérieur. Ceux dont M. Degousée fait usage, sont des outils à ressort. Le trépan à ressort, *fig*, 5, *Pl. VIII*, s'emploie lorsque des assises peu épaisses d'une roche dure sont intercalées entre des bancs ébouleux qu'il faut soutenir par une colonne de tubes, et que l'on veut faire filer la colonne à travers les assises dures. On agit alors sur celles-ci par percussion. Ce trépan est formé, comme l'indique la figure, de deux lames d'acier, terminées inférieurement par un biseau, mobiles autour des boulons *cc*, et entre lesquelles agit un fort ressort d'étau *a*, qui les pousse de dedans en dehors. La colonne de tubes étant enfoncée jusqu'à $0^m,25$, ou $0^m,30$ au-dessus de l'assise dure, on introduit le trépan à ressort dans la colonne, en rapprochant les lames. Celles-ci s'écartent par l'action du ressort, dès que l'outil est arrivé au-dessous du tube inférieur; en agissant alors par percussion, comme pour l'emploi du trépan ordinaire, on élargit suffisamment le trou dans l'assise dure, pour que la colonne de tubes puisse filer plus bas.

Quand la colonne de tubes est arrêtée par un banc d'une consistance

médiocre, comme certaines couches de craie, de marnes ou d'argiles, M. Degousée fait usage d'un outil qu'il appelle *patte d'écrevisse*, avec lequel on attaque le terrain en *rodant*, au lieu d'agir par percussion, comme avec l'instrument qui précède; les deux lames de la *patte d'écrevisse*, écartées par le ressort, sont à cet effet cintrées, tranchantes sur les bords latéraux, et terminées inférieurement par une pointe. M. Degoussée a décrit cet instrument dans les *Annales des Mines*, t. 14, 3ᵉ série, p. 319. Il emploie aussi pour élargir le trou, au-dessous d'une colonne, dans les terrains d'une dureté moyenne tels que les bancs crayeux, l'outil élargisseur *fig. 7, Pl. VIII*, armé de deux lames dentées *b*. Cet outil se compose d'une masse de fer cylindrique fixée au bas d'une tige, par un gros écrou conique également en fer. Dans la masse cylindrique sont pratiquées deux échancrures, où se logent les pièces *b*, qui tournent librement autour de deux boulons à vis verticaux engagés dans la masse, et soutenus par le gros écrou inférieur; quand les pièces *b* sont couchées dans les échancrures destinées à les recevoir, en s'appuyant sur les bords de ces échancrures, elles ont une très-petite saillie en dehors. On descend cet outil dans la colonne de tubes, en tournant dans le sens convenable pour que les lames demeurent couchées dans les échancrures. Quand il est arrivé au-dessous de la colonne, on tourne en sens contraire. Les lames se développent et mordent sur les parois dont elles enlèvent une épaisseur de 1 1/2 à 2 centimètres. Pour remonter l'instrument, on tourne en sens contraire; les lames se replient dans les échancrures, et l'outil peut rentrer dans la colonne de tubes.

Les instruments qui précèdent doivent être solidement construits; les assemblages des pièces qui les composent doivent surtout être très-forts et bien ajustés, de manière à prévenir une rupture, qui pourrait laisser au fond du trou une des lames ou un boulon dont l'extraction présenterait des difficultés.

Élargisseurs de Kind. — Kind se sert de deux sortes de trépans élargisseurs composés de deux branches articulées, et qui sont plus ou moins écartées l'une de l'autre par l'action d'un coin en fer logé entre elles, et attaché à l'extrémité de la corde du cylindre à soupape. L'un de ces trépans agit en frappant sur la roche de haut en bas. Dans l'autre, les tranchants du trépan sont retournés vers le haut, de sorte qu'il agit sur la roche, quand on le relève. Celui-ci sert à détruire la corniche de roche dure qui reste encore au-dessous de la colonne de tubes, lorsque l'on a déjà élargi le trou, dans sa partie inférieure, avec le premier trépan. Les élargisseurs de Kind, que l'on peut appeler *trépans élargisseurs à coin*, sont représentés

par les *fig.* 8 et 9, *Pl. VIII*. La figure 9 représente le trépan qui agit de haut en bas. Il se compose de deux branches *a*, *a*, dont l'une est réunie à l'autre par la charnière *b*. Un coin en fer, *c*, logé entre les deux branches, les tient plus ou moins écartées, suivant qu'il est plus ou moins enfoncé entre elles. Ce coin est garni sur les deux côtés de plaques en tôle, *d*, qui recouvrent les branches, et retiennent le coin entre elles. L'écartement de celles-ci est limité par deux goujons saillants, *e e*, entrant dans une coulisse. *g g* sont les taillants de l'outil continus dans le plan diamétral du trou; *f f* les taillants transversaux que Kind adapte à tous les trépans dont il fait usage. En dessous de ces taillants, les branches *a a* se prolongent en des appendices *h h*, qui ont $0^m,32$ de longueur, qui pénètrent dans la partie déjà forée, et servent de guide à l'outil. Le coin est lié à une fourche terminée par une tige que l'on attache à la corde du cylindre à soupape, en passant celle-ci dans l'anneau *k*. Le coin ne peut pas tomber en dessous des appendices *h h* des branches articulées, parce qu'il est armé à sa partie supérieure de deux crochets qui viennent porter sur les coulisses transversales qui limitent l'écartement des branches.

Après avoir vissé cet outil élargisseur au bas des tiges, on attache la tige du coin à la corde du cylindre à soupape. On donne de la corde, pendant qu'on descend la sonde dans le trou, afin que le coin retombe sur les coulisses *e e* et que les branches se rapprochent. Quand le trépan est arrivé en dessous de la colonne, on bande la corde du cylindre à soupape, ce qui relève le coin, fait écarter les branches de l'outil, et les applique contre la roche. On fixe la corde à la tige de la sonde, et on procède en battant comme avec un trépan ordinaire.

Le trépan élargisseur représenté *fig.* 8 *Pl. VIII*, sert à faire sauter la corniche qui reste immédiatement au-dessous de la colonne de tubes, et qui n'a pu être attaquée par l'outil qui précède. Il est formé, comme le premier, de deux branches, dont l'une est articulée à charnière en *b*, avec l'autre. Chacune d'elles se termine en bas par une partie arrondie, *c*, *c*, armée d'un tranchant aigu retroussé vers le haut. *d* est un anneau coulant qui limite l'écartement des deux branches, et qui, quand il est descendu tout à fait au bas de l'outil, recouvre les tranchants *fig.* 8 *A*. Le coin *e*, garni des feuilles de tôle *f* qui lui servent de guide, est suspendu à cet anneau; celui-ci tient à une fourche dont la tige est liée à la corde du cylindre à soupape.

Ce trépan étant fixé au bas des tiges, et le coin attaché à la corde, on laisse la corde lâche. Le coin retombe, les branches se rapprochent, et

l'on descend l'outil en dessous de la colonne. Quand il y est parvenu, on relève le coin en bandant la corde, que l'on amarre à la tête de la sonde, et les taillants du trépan attaquent la roche, en imprimant à la sonde un mouvement vertical de bas en haut. On fait ainsi sauter la dernière corniche de roche dure sur laquelle porte la colonne de tubes que l'on peut alors enfoncer par les procédés ordinaires.

Lorsque l'on a été obligé de soutenir les parois d'un trou de sonde par un tubage, sur une certaine hauteur, et que l'on rencontre, au-dessous des bancs ébouleux, des assises solides d'une grande épaisseur, on fore dans ces dernières, au diamètre intérieur des tubes, sans faire suivre la colonne.

Si l'on rencontre de nouveau, au-dessous des assises consistantes, des bancs ébouleux, on est obligé ou d'agrandir le trou, avec les outils élargisseurs que je viens de décrire, sur toute la hauteur du terrain solide, pour faire descendre la colonne supérieure, ou de placer une deuxième colonne dans l'intérieur de la première, au moyen de laquelle on soutient les parois, dans le terrain ébouleux inférieur. Par l'introduction d'une nouvelle colonne de tubes on diminue le diamètre du trou d'environ 4 centimètres. Aussi faut-il éviter, autant que possible, de multiplier les colonnes de tubes, si l'on prévoit que le sondage entrepris devra être très-profond, et qu'on aura à traverser plusieurs alternatives de bancs ébouleux, et de bancs solides, parce que cela finirait par réduire le trou de sonde à un diamètre trop faible.

Indépendamment des bancs solides qui peuvent empêcher de faire filer la première colonne de tubes, quand ils sont trop puissants, parce que l'usage des outils élargisseurs n'est pas exempt de difficultés, et que d'ailleurs les frais d'élargissement sur une grande hauteur sont considérables, la pression horizontale des couches traversées, sur le contour extérieur des tubes, met quelquefois obstacle à l'enfoncement. Cette pression est très-forte dans les terrains mous, argileux ou marneux, surtout quand on les rencontre à de grandes profondeurs. Après qu'on s'est assuré que la première colonne ne peut plus descendre, et que de nouvelles tentatives dans ce but pourraient être suivies d'accidents plus graves, on se décide à en introduire une seconde. Celle-ci peut avoir la profondeur totale du trou; alors elle est recouverte dans la partie supérieure, par la première colonne ; ou bien elle peut être descendue ou moyen d'un appareil fixé à l'extrémité des tiges, et ne pas se prolonger jusqu'à l'orifice supérieur du trou.

Colonnes de tubes perdues. — Une colonne de tubes qui ne s'élève pas jusqu'à l'orifice du trou de sonde, présente des inconvénients qui font que quelques sondeurs y ont rarement recours. Pour la descendre,

on la termine ordinairement à sa partie supérieure par un tuyau muni d'un collet plus fort, taraudé en écrou, dans lequel on engage un tampon à vis que l'on fixe à l'extrémité des tiges de la sonde. Après avoir descendu la colonne ainsi fixée aux tiges, on dégage celle-ci, en tournant de manière à dévisser le tampon. Il faut pour cela que les tiges soient assemblées à enfourchement, ou, si elles sont assemblées à vis, que le filet du tampon engagé dans le tuyau soit en sens inverse des filets des assemblages. Cette colonne *perdue* ne peut plus être prolongée par sa partie supérieure; on doit donc lui donner, avant de l'enfoncer, la longueur totale qu'elle devra avoir, longueur qu'on ne peut déterminer que sur des probabilités fort vagues. Chaque fois qu'on est obligé de l'enfoncer, à mesure de l'approfondissement du trou, il faut redescendre le tampon à vis placé à l'extrémité des tiges, engager ce tampon dans la colonne, et comme les filets de la vis du tampon et ceux des assemblages sont en sens inverse, on risque de désassembler les tiges, en cherchant à visser le tampon. Au lieu de chercher à visser la colonne aux tiges, il est préférable de fixer à l'extrémité de celles-ci, un tampon en bois qui pénètre sur une certaine hauteur dans l'intérieur des tuyaux, et qui est pourvu d'un rebord plus large par lequel il s'appuie sur leur contour supérieur; en soulevant ensuite, et laissant retomber d'une petite hauteur les tiges de sonde, et frappant à petits coups, on parvient à enfoncer la colonne, quand le trou a été au préalable élargi dans la partie inférieure. Cette manœuvre est beaucoup plus facile, lorsque la sonde est composée de deux parties réunies entre elles par une coulisse qui sera décrite plus loin, et dont il faut toujours se servir dans les sondages très-profonds. Kind, qui fait souvent usage, dans sa pratique, de colonnes perdues; recommande ce moyen de les enfoncer. Pour les descendre dans le trou, il ne se sert pas du tampon à vis, mais de l'instrument représenté *fig.* 2, *Pl VII*, qui consiste en une fourchette dont les branches *aa*, ont 0m,65 de longueur, 0m,054 de largeur et 0m,015 d'épaisseur; l'une des branches est articulée à charnière, en *c*, sur l'autre qui se termine par le pas de vis servant à fixer l'outil à la tige de la sonde; chaque branche est armée d'une rangée de goujons arrondis en fer *b*, *b*, *b*, relevés vers le haut; une pièce *e*, courbée en forme d'équerre et tournant autour d'un boulon lié à la branche fixe de la fourche, maintient les deux branches écartées, quand elle est dans la position représentée *fig.* 2, et leur permet de se rapprocher quand on relève vers le haut la partie *k* de l'équerre. Celle-ci est pourvue d'un œil auquel on attache la corde du cylindre à soupape; le tuyau supérieur de la colonne est percé de plusieurs trous espacés

de manière à recevoir les goujons *b*, *b*, *b*; quand la fourche est introduite dans ce tuyau, et que les goujons sont logés dans les trous, on place l'équerre *e* dans la position convenable pour maintenir écartées les branches de la fourche; on descend ensuite la colonne entière suspendue aux tiges par l'intermédiaire de l'instrument; on a soin de lâcher la corde du cylindre à soupape qui est attachée à la pièce *e*; lorsque la colonne est arrivée à la profondeur où elle doit rester, profondeur qui doit être exactement connue d'avance, on tire sur la corde; la pièce *e* change de position et permet aux branches de la fourche de se rapprocher; on descend un peu la tige pour dégager les goujons *b*, *b*, *b*, des trous du tuyau, et on relève les tiges sans difficulté. Quand une colonne perdue a été enfoncée jusque tout près de la base de la colonne précédente et d'un diamètre plus grand, dans l'intérieur de laquelle elle a été placée, si le terrain continue à être ébouleux, et si l'on ne veut pas enfoncer une autre colonne qui rétrécirait le trou, on est obligé d'extraire la colonne trop courte, qu'on ne peut allonger sur place. L'extraction s'opère au moyen d'arrache-tuyaux qui seront décrits plus loin : mais elle est quelquefois accompagnée de graves difficultés; d'ailleurs, les parois du trou peuvent s'ébouler pendant l'opération; enfin, malgré la précaution que l'on prend toujours de renforcer et d'évaser en forme d'entonnoir l'orifice supérieur d'une colonne perdue, il est à craindre que les outils descendus dans l'intérieur de la colonne supérieure ne viennent s'appuyer sur les bords de la colonne inférieure, et ne les dégradent. Nonobstant ces inconvénients on se sert de colonnes *perdues*, dans les sondages très-profonds, et M. Mulot en a fait usage avec succès, dans le forage exécuté à l'abattoir de Grenelle. Les tiges de sa sonde étaient assemblées à enfourchement. Kind en fait également usage, et ne laisse en général les colonnes de tubes se recouvrir que sur une hauteur de 1 à 2 mètres. M. Degousée ne les emploie que dans des cas rares et exceptionnels; leur emploi ne présente pas d'ailleurs aux sondeurs une économie aussi grande qu'on serait tenté de le croire, parce qu'après l'achèvement d'un trou de sonde, on parvient à couper les colonnes de tubes, à une profondeur quelconque, et à extraire les parties qui sont recouvertes par des colonnes d'un plus grand diamètre, de manière à n'abandonner dans le trou, après son achèvement, qu'une seule ligne de tubes de diamètres inégaux, allant en croissant depuis le fond jusqu'à l'orifice, et dans laquelle les colonnes de différents diamètres se recouvrent seulement sur une petite hauteur.

Digitized by Google

Des accidents qui arrivent dans les sondages.

Précautions à prendre pour éviter les accidents. Limites des efforts de traction et de torsion que peuvent supporter les tiges. — Les accidents les plus fréquents sont la rupture d'un outil ou de la ligne de tiges, la chute de morceaux de fer tels que des boulons, des clavettes, des outils accessoires au fond du trou, les éboulements des parois ou des roches anguleuses du fond sous lesquelles les outils s'engagent, l'écrasement ou la déformation des tubes de retenue sous la pression latérale du terrain, le déchirement de ces tubes par les outils de la sonde quand le trou a dévié de la verticale, la remontée de sables tout à fait désagrégés et presque fluides dans l'intérieur du trou.

Ces accidents peuvent occasionner des pertes de temps, et par conséquent des dépenses considérables. Ils sont quelquefois de nature à rendre à peu près impossible la continuation du forage, en ce sens qu'il en coûterait moins cher de forer un nouveau trou, que de réparer celui qui est déjà fait. Le sondeur doit donc, avant tout, prendre les précautions les plus minutieuses pour les éviter. Il veillera d'abord à ce qu'aucun corps étranger ne puisse tomber dans le trou, ou n'y soit introduit par malveillance ; il surveillera la manœuvre de l'extraction et de la descente de la sonde, pour éviter qu'une partie des tiges échappant au grappin ou aux clefs de retenne retombe d'une grande hauteur au fond du trou, chute dont le résultat serait presque toujours la rupture de la ligne de tiges en plusieurs parties qu'il faudrait extraire successivement. Il s'attachera à conserver à l'axe du trou une direction parfaitement verticale. Il emploiera des tubes de retenue à temps, aussitôt qu'il aura des indices de la nature ébouleuse ou coulante du terrain perforé. Il augmentera l'épaisseur des tubes, en raison de leur diamètre, de la nature du terrain, et même de la profondeur au-dessous de la surface. S'il sent qu'un outil est engagé, il devra manœuvrer avec les plus grandes précautions, et ne forcer sur les tiges, surtout en tournant, qu'avec beaucoup de précaution, afin d'éviter une rupture qui augmenterait les difficultés. On ne doit généralement pas s'exposer à faire subir aux tiges un effort de traction, dans le sens longitudinal, supérieur à 14 kilogrammes par millimètre carré de leur plus petite section transversale ; c'est à peu près le tiers de l'effort qui occasionnerait la rupture immédiate des tiges. S'il était fréquemment répété, il altérerait leur élasticité et finirait à la longue par déterminer leur rupture. Quant à la rupture par torsion, le moment des efforts de

torsion, c'est-à-dire la somme des produits obtenus en multipliant les forces appliquées aux extrémités des leviers, exprimées en kilogrammes, par les distances respectives des points d'application de ces forces à l'axe de la sonde exprimées en mètres, ne doit pas généralement dépasser le double du cube du diamètre des tiges, ou plutôt des cylindres qui portent les filets des vis d'assemblage, exprimé en centimètres. Ainsi, par exemple, si les vis d'assemblage ont intérieurement aux filets un diamètre de 4 centimètres, le moment des forces appliquées et tendant à rompre les tiges par torsion ne devra pas dépasser $2 \times 64 = 128$. Le moment des forces capables de rompre, par torsion, un cylindre de fer de 4 centimètres de diamètre, serait en effet, d'après quelques expériences de G. Rennie sur des fers forgés d'Angleterre et de Suède, d'environ 64×9, et il ne me paraît pas prudent de faire supporter aux barres de fer d'une sonde, même pendant un temps très-court, des efforts de torsion qui atteignent le quart de ceux qui seraient capables de produire la rupture.

Je vais maintenant revenir sur les divers genres d'accidents que j'ai énumérés, en indiquant la manière d'y remédier quand on n'a pu les prévenir.

Moyens de retirer des objets de petites dimensions qui sont tombés ou restés au fond du trou. — 1° Les objets de petite dimension, tels que des boulons, des écrous, etc., qui seraient tombés au fond du trou de sonde, sont souvent ramenés par la tarière avec les débris du terrain, quand ceux-ci sont susceptibles de faire avec l'eau une pâte consistante. Quand cet accident arrive dans un terrain dur, et que l'objet tombé n'a pas été ramené avec les boues en curant le trou, on réussit souvent à le retirer, en descendant dans le trou nettoyé la cloche taraudée, *fig.* 13, *Pl. III*, que l'on a remplie d'une argile très-compacte fortement tassée : l'objet se loge dans l'argile qui remplit la cloche et peut être ainsi ramené au jour. On peut augmenter la ténacité de l'argile employée, soit pour ramener un objet d'un petit volume, soit pour prendre une empreinte au fond du trou, sans diminuer sa plasticité, en la pétrissant avec du chanvre haché et de l'huile.

Les objets en fer de plus grandes dimensions, tels que des fragments d'outils rompus, quand on ne peut les ramener avec la cloche remplie de glaise, peuvent être extraits à l'aide des mêmes accrocheurs que les tiges, c'est-à-dire la caracole, *fig.* 31, *Pl. III*, la choche taraudée, *fig.* 13, *ibid*, le tire-bourre, *fig.* 30, lorsqu'ils ont des parties saillantes, ou une forme arrondie et oblongue. L'accrocheur à pinces,

fig. 33, *Pl. III*, est celui dont l'usage est le plus sûr, dans ces circonstances.

Les corps de forme plate, lisse et assez courte, pour qu'ils puissent se mettre à plat au fond du trou, sont les plus difficiles à extraire. On peut essayer de les ramener avec un accrocheur formé de deux branches élastiques, comme celles d'une pincette, qui vont en s'écartant de haut en bas, et sont terminées par un évasement auquel succèdent deux saillies intérieures, qui retiennent la pièce, lorsqu'on est parvenu à l'engager entre les branches. Les corps de forme arrondie et presque sphérique, comme les silex et galets, sont ordinairement ramenés avec la cloche taraudée, le tire-bourre, l'accrocheur à pinces. On est d'ailleurs assez souvent obligé d'improviser des outils accrocheurs, appropriés à la forme et à la position dans le trou des corps que l'on veut extraire.

Quand on n'a pas pu parvenir à les retirer, soit parce qu'ils sont engagés dans les anfractuosités des parois, soit à cause de leur forme, on tâche de les briser au moyen de la pointe obtuse, *fig.* 17, *Pl. III*, ou d'une pointe aiguë en forme de pyramide, et de les extraire par morceaux, ou bien de les écarter de l'axe du trou, en les refoulant dans le terrain, ce qui se fait assez facilement, lorsque l'objet est de petite dimension et que le terrain est tendre. On parvient même à refouler dans les terrains tendres des objets d'assez grandes dimensions; mais il est rare que la verticalité du trou puisse être alors exactement conservée.

Extraction des tiges rompues. — 2° Lorsqu'une tige rompt au-dessus d'un nœud, ou à une petite distance au-dessus, que la partie de sonde détachée reste d'ailleurs droite et appuyée contre les parois du trou, on la saisit assez facilement au moyen de la caracole, *fig.* 31, que l'on fait descendre dans le trou, jusqu'au-dessous du nœud; le crochet de la caracole doit être tourné en sens inverse des filets de vis des assemblages, pour qu'on ne soit pas exposé à dévisser la sonde, lorsqu'on tourne pour engager la tige rompue.

Quand la rupture arrive au milieu de la longueur d'une tige, ou au-dessous d'un nœud, on descend la cloche taraudée, ou mieux encore l'accrocheur à pinces, *fig.* 33, *Pl. III*, avec lequel on cherche à coiffer l'extrémité supérieure de la tige rompue; cela est facile, quand celle-ci n'est pas trop loin de l'axe du trou. Si elle était couchée, il faudrait tâcher d'abord de la ramener avec la caracole, ou avec un crochet adapté à l'accrocheur à pinces, *fig.* 33. Quand la tige est engagée entre les pinces dentelées, on ramène sans difficulté la partie de sonde

brisée, à moins qu'elle ne soit engagée dans la roche ou sous des éboulements.

Quand la sonde est engagée, et qu'il faut exercer un effort de traction considérable pour l'extraire, l'usage de l'accrocheur à pinces est beaucoup plus sûr dans tous les cas, même quand la rupture a eu lieu au-dessus d'un nœud, que celui de la caracole dont le crochet inférieur pourrait se rompre, ce qui augmenterait les embarras.

Quelquefois la portion des tiges de sonde restées dans le trou est rompue en plusieurs parties; c'est ce qui arrive habituellement lorsque, dans la manœuvre de l'extraction ou de l'introduction de la sonde, on laisse échapper une partie des tiges d'une assez grande longueur, qui tombe d'une grande hauteur au fond du trou. Le choc détermine alors la rupture des tiges échappées en plusieurs fragments qui se logent dans le trou les uns à côté des autres, et comme les tiges sont en même temps faussées et courbées par la violence du choc qu'elles ont éprouvé, leurs tronçons s'entrelacent de façon que l'extraction en devient extrêmement difficile. Cet accident, un des plus graves qui puissent survenir, est assez fréquent dans les sondages très-profonds où l'on fait usage de tiges de sonde ordinaires en fer. On parvient facilement à saisir un des tronçons des tiges avec l'accrocheur à pinces; mais il est rarement possible de le ramener à la surface par les plus grands efforts de traction, attendu qu'il est calé et arrêté dans le trou, soit par les autres tronçons, soit par des débris de roches; il faut alors chercher à extraire les tronçons par parties, ce à quoi l'on peut parvenir en dévissant au fond du trou les tiges dont ils se composent : pour cela on serre très-fortement les assemblages à vis de la tige de sonde dont on se sert pour extraire les fragments rompus; on arme cette sonde de l'accrocheur à pinces, et lorsqu'après avoir saisi l'un des tronçons, on ne peut l'extraire directement par un effort de traction, on tourne dans le sens convenable pour dévisser la tige saisie par les mâchoires de l'accrocheur et la détacher du reste : lorsqu'on y est parvenu, on mesure exactement la longueur de la tige ramenée au jour, et l'on prolonge les tiges de sonde d'une quantité exactement égale; on cherche à coiffer avec l'accrocheur la tige suivante du même tronçon, et à la ramener de la même manière; quand l'accrocheur rencontre un autre tronçon de tige, on cherche à le ramener tout entier, et s'il ne cède pas à l'effort de traction, on procède de la même manière.

Il est évident que des tiges assemblées à enfourchement seraient d'un grand secours pour l'extraction des tiges ainsi rompues en plusieurs parties, si ces dernières tiges étaient elles-mêmes assemblées à vis. Il peut en effet arriver, si les tiges de la sonde avec laquelle

Digitized by Google

on cherche à réparer l'accident sont assemblées à vis, qu'elles se dévissent dans le trou; mais on voit aussi que l'accident serait beaucoup plus difficile à réparer, si les tiges de la sonde rompue étaient assemblées à enfourchement : dans ce cas, il faudrait les scier dans le trou, si on ne parvenait pas à retirer les tronçons dans leur entier. On peut d'ailleurs rendre fixes les assemblages de la sonde à vis dont on se sert pour extraire la sonde rompue ; il suffit pour cela d'adapter à chaque emmanchement une goupille qui traverse à la fois la douille et le bout fileté qui la remplit. C'est en effet le parti qu'il faudrait prendre, dans le cas où l'on n'aurait pas de sonde assemblée à enfourchement, et où les autres moyens que nous avons indiqués seraient restés inefficaces.

Extraction de la sonde engagée sous un éboulement. — 3° Les éboulements que l'on n'a pas prévenus par un tubage fait en temps utile, et dans lesquels la partie inférieure de la sonde est engagée, de manière que l'extraction immédiate ne soit pas possible, sont un accident très-grave. Quand la sonde est assemblée à vis, on peut dévisser dans le trou les tiges supérieures et les extraire. La séparation se fera nécessairement dans l'un des assemblages qui se trouvent au-dessus de l'éboulement; on saisit avec une caracole ou un accrocheur à pince fixé à l'extrémité d'une ligne de tiges assemblées à enfourchement, ou dont les assemblages auront été fortement serrés ou rendus fixes, s'ils sont à vis, la tige supérieure de la partie restée dans le trou, au-dessous du nœud ; celle-ci une fois engagée dans l'accrocheur, on tournera dans le sens convenable pour dévisser la tige saisie, que l'on ramènera au jour ; quand elle aura été ainsi détachée du reste de la sonde, on dévissera par le même procédé, toutes les tiges qui seront saillantes au-dessus des terres éboulées ; puis on videra ces terres avec la tarière, ou d'autres instruments appropriés, jusqu'à ce qu'on ait mis à nu l'extrémité d'une nouvelle tige. On essayera alors de coiffer celle-ci avec l'accrocheur à pinces, et de la séparer, en la dévissant, des tiges inférieures. On pourra parvenir à la séparer des autres, et ensuite à l'arracher du milieu des déblais, si l'éboulement n'est pas trop fortement tassé. Mais il faudra exercer des efforts considérables de torsion et de traction, et la réussite sera dans tous les cas fort incertaine ; à mesure qu'on sera parvenu à extraire une tige, on extraira les matières éboulées, jusqu'à la tige suivante et ainsi de suite.

Il est inutile d'observer que l'on devra tuber le trou pour prévenir les nouveaux éboulements qui pourraient survenir. Du reste, l'accident dont je parle ici, ne peut être que la suite d'une grande impru-

dence de la part du directeur d'un sondage, qui aurait négligé de soutenir par un tubage, des parois ébouleuses.

Écrasement et déchirures des tubes de retenue. — 4° L'écrasement des tubes de retenue sous la pression du terrain, est une circonstance qui peut forcer à abandonner le sondage.

Il en est de même des déchirures des tubes, dans des bancs ébouleux, par l'action des outils de la sonde; ces déchirures sont presque inévitables, lorsque l'axe du trou a été notablement dévié de la direction verticale, parce que, dans ce cas, toutes les fois qu'on descend la sonde armée d'un trépan, celui-ci glisse sur le tube, finit par le déchirer, et quelquefois même par passer au travers. Lors du forage, on doit prendre, je le répète, les plus grandes précautions, pour que l'axe du trou ne soit pas dévié de la verticale. Cette déviation est fréquente dans les bancs tendres que l'on traverse avec des tarières, ou autres outils analogues, qui attaquent le terrain par un mouvement de rotation continu, et peuvent y pénétrer obliquement, en s'engageant dans les parties les plus tendres, ou en glissant sur les plans de stratification, lorsque ceux-ci sont inclinés à l'horizon. On peut prévenir la déviation, en faisant usage, de temps à autre, dans ces terrains, de trépans à très-fortes tiges, agissant par percussion. Les trous forés en *battant* se maintiennent, en général, beaucoup mieux dans la verticale que les trous forés en *rodant.* L'emploi des trépans à oreilles, à taillants droits, et de la *croix* de Kind, nous paraît devoir assurer dans tous les cas la verticalité, et nous n'hésitons pas à en recommander l'usage aux sondeurs. Il est malheureusement fort difficile de reconnaître si un trou de sonde est exactement vertical, et, quand il ne l'est pas, de déterminer à quelle hauteur la déviation a commencé : on n'a d'ailleurs aucun moyen de remédier au mal.

Extraction des tubes de retenue, et arrache-tuyaux. — 5° Si l'on reconnaissait qu'une colonne de tuyaux n'aura pas une épaisseur suffisante pour résister à la poussée du terrain, ou qu'elle a un diamètre trop étroit, et qu'il convient d'élargir le trou pour lui en substituer une autre plus large, on devrait retirer du trou la première colonne.

On se sert pour cela de divers arrache-tuyaux, *fig.* 7, 8 et 9, *Pl. VIII*, et *fig.* 3 et 4, *Pl. VII.* L'arrache-tuyaux ordinaire *fig* 8, *Pl. VIII*, est composé de deux branches, l'une fixe, et l'autre mobile qui est tenue écartée de la première par l'action d'un ressort. Vers le bas, les deux branches sont pourvues de bourrelets saillants exté-

rieurement. On rapproche la branche mobile, pour introduire dans le trou l'instrument que l'on fait descendre jusqu'au-dessous de la base de la colonne qu'il s'agit d'extraire. Si les deux branches s'écartent en pénétrant sous les tuyaux, et si la colonne n'est pas retenue par la pression du terrain, on parvient à l'extraire en une seule fois. Cet arrache-tuyaux est mieux approprié à l'extraction des buses en bois qui ont une épaisseur de 3 centimètres, qu'à celles des tuyaux en tôle, et l'on ne parvient guère à extraire avec cet instrument que des colonnes en tôle d'une petite hauteur, qui ne sont pas fortement engagées dans le terrain.

Outil servant à couper les colonnes de tuyaux. — L'arrache-tuyaux *fig.* 7, *Pl. VIII*, le même que l'outil élargisseur employé par M. Degousée qui a été déjà décrit, sert, en changeant les pièces mobiles placées dans les échancrures, non-seulement à l'extraction d'une colonne de tubes en bois ou en tôle, mais encore à diviser la colonne en plusieurs tronçons, que l'on extrait successivement, quand elle refuse de venir tout entière.

Quand on veut extraire une colonne entière, en la prenant au-dessous de sa base, on adapte à l'instrument les pièces mobiles *c*, qui sont creusées en dessus. Il est inutile d'observer que leur longueur doit être telle que, dans leur développement, elles s'engagent sous la colonne qu'on veut extraire, en frottant légèrement contre les parois du trou foré dans le terrain. On descend donc l'outil en dessous de la colonne, on tourne dans le sens convenable, pour développer les lames, et quand elles sont engagées sous la colonne, on force avec le treuil ou le cabestan sur le câble de la sonde.

Quand la colonne ne peut être extraite en une seule fois, il faut la couper, et l'extraire par tronçons; on y parvient, en substituant aux pièces *c* les pièces *a*, courbées en forme de virgule, pointues et tranchantes sur leur bord extérieur, et terminées supérieurement par un plan incliné de l'axe vers la circonférence. Après avoir descendu l'outil à la profondeur où la colonne doit être coupée, on laisse la sonde suspendue au câble, et l'on tourne dans le sens convenable pour que les lames se développent; celles-ci coupent la colonne en la déchirant, et lorsqu'elle est divisée, on extrait la partie supérieure en forçant sur le câble de la sonde. Par une autre opération, on détachera un deuxième tronçon que l'on ramènera de la même manière, et ainsi de suite jusqu'à ce que la colonne soit entièrement extraite.

Si l'arrache-tuyaux ne pouvait pas ramener le tronçon supérieur de la colonne en une seule pièce, on pourrait dégager l'instrument, en

imprimant à la sonde un mouvement de rotation en sens inverse, qui aurait pour résultat de faire rentrer les appendices dans les cavités qui peuvent les contenir.

L'opération que je viens de décrire n'est pas sans difficultés, et souvent elle se complique d'accidents graves, notamment de la rupture d'un emmanchement sous un trop grand effort de torsion. Les tuyaux sont d'ailleurs fréquemment déchirés irrégulièrement par l'action des lames, et mis tout à fait hors de service. Pour parer à ces inconvénients, on a employé, comme arrache-tuyaux, un tampon conique portant un filet de vis en acier fortement trempé, que l'on introduit dans la partie supérieure de la colonne : mais quand celle-ci est retenue par la pression du terrain, elle se déchire, et souvent même la partie attaquée par le filet saillant du tampon se détache du reste, de façon que l'opération échoue complétement. Le tampon à vis arrache-tuyaux est analogue, comme on le voit, à la cloche taraudée, mais d'un effet bien moins sûr que celle-ci, à cause de la petite épaisseur des tubes en tôle.

Arrache-tuyaux de M. d'Alberti. — M. d'Alberti, savant géologue, et directeur des salines de Rottenmünster, dans le Wurtemberg, a employé avec succès dans plusieurs circonstances, la méthode suivante pour extraire des colonnes de tubes fortement retenues dans le terrain par la pression latérale extérieure.

Il fixe à l'extrémité des tiges de la sonde un tampon en bois *a* (*Pl.* 9, *fig. VIII*), ayant la forme d'un tronc de cône, dont la grande base tournée vers le bas a un diamètre un peu plus petit que le diamètre de la colonne de tuyaux que l'on veut extraire. Ce tampon est retenu par un écrou *e*, Au-dessus du tampon conique, on descend, en le tenant un peu écarté de celui-ci, un manchon BB', formé de douves en bois maintenues par un ou deux cercles minces en fer placés à la partie supérieure du manchon. Le diamètre intérieur du manchon est intermédiaire entre les diamètres de la grande et de la petite base du tampon conique; son diamètre extérieur est tel qu'il puisse descendre librement dans l'intérieur de la colonne à extraire; mais l'épaisseur des douves ajoutée au rayon de la base inférieure du tronc de cône dépasse le rayon intérieur de la colonne; les douves sont terminées au bas et intérieurement par un biseau.

Cela posé, on fait descendre le tampon conique, fixé au bas des tiges jusqu'à une certaine profondeur, dans l'intérieur de la colonne que l'on veut arracher; on descend ensuite le manchon BB' que l'on a enfilé autour des tiges, et que l'on tient suspendu avec deux ou trois petites cordes. On laisse le manchon reposer sur ce tampon. En for-

çant sur le câble de l'engin, pour relever le tampon, celui-ci pénètre dans le manchon, écarte par le bas les douves qui se trouvent ainsi logées, comme des coins, entre le tampon et le tuyau, et déterminent par suite du frottement résultant de la pression, une adhérence très-forte, suffisante pour entraîner une colonne qui aurait refusé de suivre le tampon à vis. Si l'on ne peut parvenir à faire suivre la colonne, il est toujours facile de dégager l'outil, en laissant descendre le tampon, tandis qu'on retient le manchon au moyen des cordes qui ont servi à le descendre. Le manchon doit avoir un poids assez grand pour s'enfoncer entre le tampon et la colonne.

On peut, au lieu de le descendre après coup, le fixer à la tige au moyen d'une croix en fer percée d'un œil qui lui permette de monter et de descendre le long de cette tige, et de tourner autour d'elle. Mais il faut toujours le tenir suspendu au moyen de petites cordes, qui sortent par l'orifice du trou, jusqu'à ce que le tampon étant arrivé dans l'intérieur de la colonne, on le laisse retomber sur lui.

Navette de Kind. — Kind a fait usage, dans le forage de Cessingen, d'un arrache-tuyaux très-simple et très-ingénieux; il consiste simplement en un morceau de bois, de 0m,60 de longueur, renflé dans son milieu en forme de navette, *fig.* 4, *Pl. VII*, que l'on fixe à l'extrémité des tiges. Ce morceau de bois, fortement cerclé en fer à ses deux bouts, est traversé par une tige que l'on assemble à celle de la sonde. Son plus grand diamètre est un peu plus petit que le diamètre intérieur de la colonne qu'on veut extraire. On descend la navette fixée aux tiges de la sonde jusque vers le bas de la colonne de tuyaux à extraire; puis on verse dans la colonne une corbeille de gravier de rivière à gros grains qui se logent entre le tuyau et la partie supérieure de la navette. Quand on relève les tiges de la sonde, ces graviers font coin entre le bois et les tubes qui sont enlevés avec la navette.

Si la colonne à extraire est une colonne perdue dont l'orifice n'arrive point à la surface, le gravier jeté par l'orifice du trou n'arrivera qu'en partie dans l'intérieur de cette colonne. Dans ce cas, on pose sur la *navette*, avant de l'introduire dans le trou, un tuyau en tôle de 2 mètres de longueur, d'un diamètre extérieur assez petit pour qu'il puisse entrer dans la colonne à extraire. Ce tuyau, muni d'une anse par laquelle il est attaché à la corde du cylindre à soupape, est rempli de sable graveleux qui est retenu en bas par la *navette*, et ne peut s'échapper que lorsqu'on soulève le tuyau. Après avoir descendu la navette jusque tout près de l'extrémité inférieure de la colonne à extraire, on relève le tuyau au moyen de la corde; le sable se répand au dehors, et l'on relève les tiges qui ramènent la colonne.

L'extraction des colonnes de tubes exige quelquefois des efforts de traction considérables. C'est pourquoi il est nécessaire de se servir, pour cette opération, de tiges en fer d'un fort équarrissage; si la colonne ne cède pas sous l'effort que les tiges employées peuvent supporter sans se rompre, il est facile de dégager celles-ci, et de ramener la *navette* au jour. Il suffit, pour cela, de laisser descendre la navette jusqu'au-dessous de la colonne. Il y a presque toujours quelques parties du trou plus larges, qui laissent entre elles et la navette un espace libre par lequel le sable s'écoule, ce qui permet de relever les tiges.

Quand l'opération réussit, la colonne de tubes est démontée, à mesure qu'elle dépasse l'orifice du trou, dans l'ordre inverse de celui dans lequel ses parties ont été assemblées entre elles pour les introduire. Cette opération se fait en tenant suspendues dans le trou, au moyen du collier en bois, *fig.* 4, *Pl. VIII*, les parties inférieures de la colonne. Lorsque la partie supérieure de la colonne est séparée de celle qui reste dans le trou, on la soulève un peu, et on saisit la tige dans une clef à deux manches analogue à la pièce, *fig.* 32, *Pl. III*, laquelle clef porte sur les bords de la colonne suspendue. On dévisse ensuite la partie supérieure des tiges, et on retire sans difficulté le tronçon supérieur de la colonne.

Arrache-tuyaux à coin de Kind. — La *fig.* 3, *Pl. VII*, représente un autre arrache-tuyaux également inventé par Kind, et qui peut aussi servir à introduire une colonne dans le trou. Il est formé d'une pièce de bois de chêne de 1 mètre à 1m,30 de long, de forme cylindrique, et remplissant à peu près exactement le vide intérieur du tuyau. On la coupe en deux, en enlevant dans son milieu un morceau en forme de coin, ayant 0m,015 d'épaisseur en bas, et 0m,06 à 0m,07 d'épaisseur en haut. L'instrument est ainsi composé de trois parties, les deux demi-cylindres et le coin intermédiaire. Les deux demi-cylindres sont fixés aux deux branches d'une fourche en fer assez longue, afin qu'elles soient flexibles tout en conservant une section qui les mette à même de supporter un grand effort de traction. La tige de la fourche est terminée par un pas de vis qui sert à l'adapter aux tiges de la sonde. Le coin *e* est aussi lié à une tige en fer terminée par un pas de vis; cette tige s'adapte au bas de la tige à *coulisse* du cylindre à soupape qui sera décrite plus loin, et qui est représentée dans la *fig.* 6, *Pl. VI*. Au-dessus de la coulisse, on adapte une tige en fer du poids de 25 à 30 kilogrammes, qui est attachée à la corde du cylindre à soupape par l'intermédiaire de l'étrier à boulon tournant. Quand l'instrument est descendu près de l'extrémité infé-

Digitized by Google

rieure de la colonne à extraire, on enfonce le coin dans l'entaille, en soulevant avec la corde la tige supérieure à la coulisse et la laissant retomber; celle-ci, retombant sur la tige inférieure, fait l'office d'un mouton et enfonce le coin. Les demi-cylindres sont appliqués ainsi contre les parois du tuyau avec une force telle que le glissement devient à peu près impossible, et que la colonne de tuyaux est ramenée au jour. Pour faire lâcher prise à l'instrument, il suffit de retirer le coin, ce qui est facile.

6° Les sables coulants, qui remontent du fond dans l'intérieur du trou, doivent être extraits avec les cylindres à soupape à boulet, *fig.* 25 et 26, *Pl. III.* Il faut en même temps enfoncer la colonne de tubes de retenue, autant que possible, en essayant même de frapper quelques légers coups de mouton, pour leur faire traverser les couches ébouleuses le plus rapidement possible.

Quand un forage est terminé, s'il n'a été entrepris que pour reconnaître la nature des couches dont le terrain se compose, et qu'il ne soit pas utile de le conserver plus longtemps, on extrait avant de l'abandonner, les tubes de retenue, si l'on a été obligé d'en faire usage. Cette extraction s'opère en commençant par la colonne du diamètre le plus petit qui a été introduite la dernière, suivant les méthodes décrites précédemment, et avec les outils indiqués.

Vérificateur de M. Degousée. — Il est souvent utile de vérifier après coup la nature de la roche, à diverses profondeurs au-dessous du sol. On y parvient facilement, dans les parties où le trou n'a pas été tubé, au moyen de l'outil *fig.* 10, *Pl. VIII*, qui se compose de l'outil élargisseur *fig.* 7, armé de lames dentées, au-dessous duquel on a fixé un vase en tôle qui reçoit les débris détachés des parois par les lames.

Appareil de M. Évrard, pour déterminer l'inclinaison et la direction des couches. — M. Évrard, professeur à Valenciennes, a imaginé un instrument représenté *fig.* 11, *Pl. VIII*, au moyen duquel on peut déterminer, quand le diamètre du trou est un peu considérable, le degré et le sens de l'inclinaison de certaines couches tendres et feuilletées, comme le sont, par exemple, les schistes du terrain houillier.

Après avoir nettoyé avec beaucoup de soin le fond du trou, M. Évrard descend à l'extrémité des tiges, un outil formé d'une lame tranchante, dont le plan passe par l'axe des tiges et du trou, sans que le milieu de la lame soit sur cet axe. Cette lame est garnie d'ailes en bois boulonnées dessus, dont les plans viennent se croiser suivant l'axe des tiges, dans l'axe du trou. La lame étant fixée au bas de la première

tige et suspendue au câble de l'engin, on prend à la surface, au moyen de deux fils à plomb, l'orientation du plan vertical de la lame. Il faut ensuite la descendre au fond du trou, en ayant soin de la maintenir exactement dans le même plan; M. Évrard y parvient au moyen de deux règles qu'il adapte successivement au moyen d'un collier et d'une vis de pression sur les assemblages des tiges qui sont vissées au-dessus les unes des autres pour prolonger la sonde. On fixe l'une des règles sur l'assemblage, en ayant soin de la tourner de façon qu'elle soit dans le plan vertical de la lame dont l'orientation est repérée à la surface, ainsi qu'il a été dit. On descend la sonde jusqu'à ce que la règle soit au niveau du sol. Si la sonde a tourné, on la ramène en se guidant sur cette règle. Puis après avoir vissé une autre tige, on adapte au nœud supérieur une seconde règle qui soit dans le plan vertical de la première. On détache celle-ci, on descend la sonde; on ramène la deuxième règle arrivée au niveau du sol, dans le plan repéré, etc. On parvient ainsi, en alignant les deux règles le long de la tige, et en ramenant la règle qui demeure fixée à la sonde pendant qu'elle descend, dans son plan primitif, à prévenir la rotation de la sonde pendant la descente; et comme les tiges ne peuvent guère éprouver de torsion pendant cette manœuvre, la lame arrivée au fond est orientée comme à la surface. Cette lame s'imprime sur le fond du trou, par le poids de la sonde, et y laisse un trait apparent.

M. Évrard descend ensuite un outil formé de quatre lames tranchantes, de 25 centimètres de long, boulonnées à la circonférence d'un cylindre plein ou creux, d'un diamètre un peu plus petit que celui du trou; ce cylindre est cannelé extérieurement entre les lames, pour laisser le passage libre aux boues.

Les quatre lames viennent se poser à la circonférence du trou; elles attaquent, en rodant, le terrain tendre, dans lequel elles creusent une gouttière circulaire, en laissant entre elles le témoin sur lequel la lame a imprimé sa trace.

Quand la gouttière est creusée dans les schistes tendres du terrain houiller, sur 10 à 12 centimètres de profondeur, il arrive ordinairement qu'en relevant la sonde, le cylindre intérieur se détache du terrain, reste engagé entre les lames et est ramené à la surface. La structure du morceau ainsi ramené, fait connaître le degré d'inclinaison des feuillets et de la stratification qui est parallèle aux feuillets.

On conclut le sens de l'inclinaison et de la direction des feuillets, de l'empreinte laissée par la lame sur le sommet de l'échantillon. Il suffit, pour cela, de mesurer l'angle que cette empreinte, dont l'orien-

tation est repérée et connue, forme avec la ligne de direction des feuillets.

Quand l'échantillon ne se détache pas seul de sa base, M. Évrard emploie pour le détacher, l'outil représenté *fig.* 11, *Pl. VIII*, qui se compose de deux branches appartenant à un même anneau cylindrique, et portant à leurs bases deux pièces courbées en forme de virgules, disposées à l'intérieur des branches, comme le sont à l'extérieur du manchon, les pièces mobiles de l'arrache-tuyaux, *fig.* 7. Les branches sont introduites dans la gouttière creusée par l'instrument, puis, en tournant dans le sens convenable, les pièces mobiles s'engagent dans la base de l'échantillon qu'elles ramènent (*Voyez*, pour plus de détails, la *Notice* de M. Évrard, *Ann. des mines*, t. XVIII, 1840, p. 53).

Lorsqu'un trou de sonde doit être conservé, soit pour ramener à la surface des eaux montantes du fond, soit pour absorber les eaux superficielles, soit pour servir à l'exploitation du sel gemme par dissolution, ou à l'aérage d'une mine, on doit laisser dans le trou, les tubes, de retenue que l'on a enfoncés pour prévenir l'éboulement des parois; mais, lorsque l'on a été obligé d'enfoncer plusieurs jeux de tubes, les uns dans les autres, et que ces jeux se recouvrent mutuellement sur de grandes hauteurs, il est généralement inutile de les abandonner tous. Ainsi, on coupe les colonnes successives, en commençant par celle dont le diamètre est le plus petit et qui est plus profonde que les autres, à une certaine hauteur au-dessus du point où elle est recouverte extérieurement par la colonne précédente. On se sert de l'outil *fig* 7, *Pl. VIII*, armé de lames tranchantes, et l'on extrait, en général avec facilité, le tronçon supérieur.

On coupera de même l'avant-dernière colonne, un peu au-dessus du point où elle est recouverte par une autre, et ainsi de suite. On n'hésitera cependant pas à abandonner plusieurs colonnes concentriques, si l'on craint que les colonnes extérieures n'aient été dégradées et ne présentent une résistance insuffisante, pour soutenir la poussée du terrain.

Perfectionnements récemment introduits dans l'art du sondeur.

Difficultés croissantes avec la profondeur. — Les dépenses et les difficultés de tout genre, croissent très-rapidement avec la profondeur des sondages. L'énorme poids des tiges, le *fouet* de ces longues tiges

contre les parois du trou, le temps considérable qu'il faut employer pour l'extraction et la descente de la sonde, la rupture plus fréquente des tiges, quand on agit en sonnant, sont les causes principales de l'accroissement des dépenses. On a proposé et employé avec succès, dans ces dernières années, plusieurs procédés qui ont pour but d'atténuer ces difficultés.

Sondage à la corde. — On a d'abord essayé de substituer aux tiges rigides en fer, une corde s'enroulant sur un treuil, et à l'extrémité de laquelle est suspendu l'outil qui doit broyer le terrain; un engin d'une hauteur médiocre, un treuil ou cabestan, un levier ponr le *battage* sont avec le câble et des outils appropriés, les seuls instrnments nécessaires dans ce procédé, qui paraît être usité en Chine depuis fort longtemps, et qui est en conséquence appelé le procédé chinois. Les *fig.* 6 *et* 7, *Pl. VII*, représentent l'engin, le treuil, le levier, et les dispositions préparatoires d'un sondage de ce genre, exécuté à Roche-la-Molière, près Saint-Étienne, en 1834, sur un diamètre de 0m,15.

L'engin est à quatre montants, d'environ 4 mètres de hauteur totale; il est installé sur l'orifice d'un puits de 2m,50 de profondeur que l'on a creusé pour commencer le sondage, et dans l'axe duquel on a installé une buse en bois, pour diriger l'outil, au commencement de l'opération. La corde de suspension passe sur une poulie en chêne placée au haut de l'engin, et va s'enrouler sur l'arbre d'un treuil à double manivelle, que l'on remplaça quand le trou fut plus profond, par un cabestan vertical. Un levier dont le grand bras a 4 mètres, et le petit 0m,70 de longueur, terminé par un secteur circulaire, sert à soulever l'outil, pour la manœuvre du battage. A cet effet, une corde fixée par son extrémité au point le plus élevé du secteur circulaire pend sur ce secteur et se relie à la corde de la sonde par un simple nœud coulant et une cordelette. Pour que la corde de la sonde demeure toujours tendue, le long bras du levier porte un crochet par lequel il est lié, au moyen d'une courroie, à l'extrémité d'une perche élastique en bois de 4 mètres de long, posée sur le sol.

Les outils dont on a fait usage, imités de ceux que M. le conseiller des mines de Prusse Sello avait employés à Saarbrücken, pour des sondages de ce genre, étaient : 1° un trépan ordinaire, *fig.* 8, fixé à vis au bas d'une tige en fonte, *fig.* 9. La tige en fonte était suspendue au câble par le moyen d'un anneau tournant, comme celui d'une tête de sonde ordinaire; carré dans sa partie intermédiaire, elle était terminée en haut et en bas par deux bourrelets cylindriques, portant quatre cannelures pour le passage des boues, et d'un diamètre exté-

rieur égal à la largeur du ciseau. L'écrou destiné à recevoir la tige filetée du trépan était taraudé dans l'axe du bourrelet inférieur. L'expérience a prouvé que ce mode d'assemblage était défectueux, et on lui a substitué ensuite un emmanchement à tenon avec clavette et contreclavette, *fig.* 9 A.

2° Un alésoir à huit arêtes saillantes aciérées, *fig.* 10.

3° Un cylindre à soupape.

4° Une clef à charnière, *fig.* 11, que l'on fixe sur la corde de la sonde, au-dessus de l'orifice du trou, et qui sert à tordre celle-ci, pour imprimer au ciseau un mouvement de rotation.

	fr.	c.
L'établissement de l'engin et des accessoires a coûté. . .	139	50
140 mètres de corde de 34 mil. de diamètre, pesant 1 kil. le mètre, à 1 fr. 43 c. le kil.	200	20
2 trépans, pesant ensemble 42 kil. à 1 fr. 50 c. . . .	63	»
1 alésoir, pesant 26 kil. à 1 fr. 50 c..	39	»
1 cylindre à soupape, 42 kil. à 1 fr. 25 c.	52	50
94 kil. de tiges en fonte, à 40 fr. les 100 kil.	37	60
Anneaux et chappes, 6 kil, 37 à 1 fr. 50 c.	9	55
Total.	541	35

L'outil suspendu à l'extrémité de la corde ne peut agir sur la roche que par percussion, et, par conséquent, le terrain ne peut être attaqué avec les tarières et autres outils qui agissent en *rodant.*

Pour sonder à la corde avec le trépan, deux ouvriers agissent sur le long bras du levier, *fig.* 1, soulèvent et laissent retomber la sonde; pendant ce temps, un autre ouvrier placé sur les bords du trou, tord la corde au moyen du manche, *fig.* 11, qui y est adapté. Il paraît avantageux de tordre la corde quand l'instrument est au fond du trou; la tête de l'anneau tournant participe à ce mouvement de torsion, et puis quand l'outil est relevé, l'ouvrier tourne la clef en sens inverse, et aide ainsi le mouvement du câble qui, en se détordant, entraîne l'outil. Lorsque les débris de la roche broyée gênent l'action de l'outil, on nettoie le trou au moyen d'un cylindre à soupape, auquel on imprime au fond du trou un mouvement alternatif dans le sens vertical, de la même manière qu'au trépan.

L'expérience du trou foré à Roche-la-Molière, jusqu'à 45 mètres de profondeur, sur 0m,15 de diamètre, dans un terrain houiller composé de bancs alternatifs de grès, de schistes tendres et argileux, avec rognons de minerai de fer carbonaté lithoïde; les trous d'un diamètre plus grand et beaucoup plus profonds, forés par M. Selio dans le ter-

rain houiller de Saarbrücken, et par M. Frommann dans le grès bigarré de Saarlouis, prouvent qu'on réussit très-bien à forer des trous parfaitement cylindriques et bien verticaux, avec de simples trépans suspendus à l'extrémité d'un câble, et fixés au-dessous d'une tige en fonte ou en fer, avec bourrelets cylindriques, analogue à celle qui est représentée dans les *fig* 9. Ce procédé de sondage paraît même plus économique que le procédé ordinaire, dans les terrains consistants, non ébouleux et pour des trous peu profonds. Le sondage de Roche-la-Molière, poussé jusqu'à 45 mètres de profondeur, a coûté 16 fr. 87 c. le mètre courant, et il a été arrêté à la suite d'éboulements de rognons de fer carbonaté qui auraient dû être soutenus par un tubage. Un puits du même diamètre, creusé dans le terrain houiller de Saarbrücken, jusqu'à 35 mètres de profondeur par M. Sello, a coûté 11 fr. 28 c. le mètre courant; un autre trou dans le grès bigarré, foré jusqu'à 55 mètres, est revenu à la somme très-modique de 4 frs. 91 c. le mètre. Enfin, M. Sello a foré avec succès des trous de $0^m,50$ de diamètre, qui ont été de véritables puits d'aérage.

Il ne me paraît pas douteux, d'après cela, que l'emploi de la corde et du procédé décrit ci-dessus ne soit économique pour les trous peu profonds dans les terrains durs, ou au moins consistants et non ébouleux, comme le sont la plupart des assises qui composent les terrains houillers. Mais les essais tentés jusqu'ici, à ma connaissance, par diverses personnes, dans des terrains contenant des bancs de marnes, d'argiles tendres, ou de sables, ont tous échoué. Les outils se sont engagés dans le terrain ou sous des éboulements, et on n'a pu les retirer.

Essai de Kind. Son opinion sur le sondage à la corde. — Le sondeur Kind rapporte dans son ouvrage si souvent cité, le résultat d'un essai de sondage à la corde par le procédé décrit dans l'ouvrage de M. Frommann (1). Cet essai eut lieu dans un puits creusé à Stotternheim (grand-duché de Weimar), et qui était arrivé à la profondeur de 900 à 1000 pieds, soit 300 mètres. Le poids de l'outil dont on fit usage d'abord était à peu près de 250 livres; ce poids reconnu trop faible fut porté jusqu'à 800 livres, et malgré cette augmentation il était, suivant Kind, impossible de s'apercevoir si l'outil était ou non

(1) *Geologische und physikalische Betrachtungen über das Entstehen von Springquellen, durch gebohrte Brunnen,* par Fromman.

soulevé en même temps que la corde. Après plusieurs jours de travail, on revint à la sonde à tiges, et l'on reconnut que le trou n'avait été approfondi que de 3 pouces environ. Un second essai n'ayant pas donné un résultat plus favorable, Kind en conclut l'impossibilité de forer à la corde à des profondeurs supérieures à 150 ou 200 pieds.

Le sondage à la corde, dans l'état où il se trouve aujourd'hui, paraît donc exclusivement propre à une classe particulière de terrains, notamment à la plupart des terrains houillers et à des profondeurs médiocres (50 à 60 mètres). Il peut d'ailleurs se combiner avantageusement avec le sondage par le procédé ordinaire, l'emploi des tiges rigides et des accrocheurs connus donnant la facilité de retirer, en cas d'accident, les outils qui sont restés au fond du trou (*Voyez*, pour plus de détails, les *Annales des Mines*, t. V, p. 271, et t. VIII, p. 317).

Emmanchement à coulisse. — Une amélioration très-importante à l'ancien procédé de sondage avec des tiges rigides, est celle qui est due à Kind ou à M. D'Œynhausen, conseiller supérieur des mines de Prusse (1). Elle consiste à composer la tige, lorsque le sondage est arrivé à une profondeur considérable, de deux parties distinctes, réunies entre elles par une sorte de coulisse qui est représentée par les *fig.* 11, 12, 13, 14, 15 et 16, *Pl. VIII*. Elle se compose d'une tige carrée *b*, invariablement liée par un emmanchement ordinaire aux tiges inférieures, et qui passe dans une ouverture carrée ménagée dans la pièce cylindrique *c*; la tige carrée peut glisser librement dans

(1) M. Le Play, dans une notice publiée dans les *Annales des Mines*, tome XV, 3e série, page 447, attribue ce perfectionnement à M. D'Œynhausen. Kind dit, dans son ouvrage, qu'il a été conduit à diviser les tiges de la sonde en deux parties jointes ensemble au moyen d'une coulisse, par les ruptures fréquentes de tiges qui étaient survenues dans le trou de sonde qu'il exécutait à Stotternheim, et qui avait atteint la profondeur de 1000 pieds. Le puits foré de Stotternheim fut commencé le 24 mars 1830 et terminé le 13 avril 1835. Il avait atteint la profondeur de 1000 pieds le 30 avril 1834. C'est donc à cette dernière date que remonte l'invention de Kind. M. de Dechen rapporte que M. D'Œynhausen avait fait usage de l'emmanchement à coulisse dans le sondage de Neusalzwerk dès le mois de juin 1834 (Karsten, archiv, vol. XII, p. 73). Ce serait donc à peu près à la même époque que MM. Kind et d'Œynhausen auraient, chacun de son côté, imaginé le même perfectionnement.

Digitized by Google

cette ouverture d'une longueur égale à $ik=fg$. Le cylindre *c* est lié par les deux branches *a* et la tige *q* à la partie supérieure des tiges, au moyen d'un emmanchement ordinaire. La tige carrée *b* se termine au-dessus de l'ouverture par deux appendices ou patins, qui glissent dans l'espace compris entre les deux branches *a*, et par lesquels la partie inférieure de la tige est portée sur les bords de l'ouverture percée dans le cylindre *c*. De cette disposition, il résulte que les deux parties de la tige ne sont pas solidaires, bien que la rotation de l'une se transmette à l'autre. Lorsque la partie inférieure vient frapper le fond du trou, dans le battage, la partie supérieure demeure suspendue au câble de l'engin, et la pièce *c* glisse en descendant le long de la tige *b*, de sorte que les vibrations du bas ne se communiquent point au haut de la tige. On a d'ailleurs soin de limiter l'excursion du levier ou balancier qui sert au battage, de telle sorte que la pièce *c* ne descende pas jusqu'à venir frapper l'épaulement *f*, ou le fond *k* de l'étrier sur le sommet *i* des patins de la tige carrée. Ainsi toute la tige supérieure n'a d'autre fonction que de soulever la tige inférieure, et de lui imprimer le mouvement de rotation, dans la manœuvre du battage. Son poids demeure toujours supporté par le câble, et la partie inférieure seule agit par son poids pour attaquer le terrain. On évite ainsi presque entièrement le *fouet* des longues tiges solidaires, qui dégrade les parties supérieures du trou, ainsi que les ruptures et la destruction rapide des assemblages, qui étaient le résultat inévitable de l'action du poids des parties supérieures de la tige sur les parties inférieures, quand toutes étaient assemblées d'une manière invariable, et qu'on opérait par percussion : en outre, la verticalité du trou est plus facile à conserver dans des roches dont la consistance n'est point uniforme.

Avec cet appareil, M. D'Œynhausen a pu réduire de beaucoup les dimensions de la partie supérieure des tiges, qui ne sert qu'à la transmission du mouvement. Ainsi, dans le sondage de Neusalzverk, en Westphalie, à la profondeur de 403 mètres, la partie supérieure de la tige qui avait 356 mètres de longueur, était formée de barres carrées de $0^m,026$ de côté; la partie inférieure, la seule qui agit sur le fond par percussion, avait 37 mètres de longueur seulement, et la dimension des barres était un carré de $0^m,52$ de côté. L'action de la sonde sur la roche était tout aussi forte que lorsque la sonde entière était formée de tiges invariablement liées entre elles. On conçoit, en effet, que lorsque ces tiges d'une longueur énorme viennent frapper sur le sol par leur pied, la plus grande partie de la force vive acquise dans la chute n'agit pas sur la roche, mais se perd en vibrations, ou est employée à détruire les assemblages. Il est même impossible de laisser

Digitized by Google

tomber une sonde très-longue d'une hauteur de plus de 0m,15 à 0m,10, sans s'exposer à des ruptures de tiges, tandis que le battage avec des tiges divisées par l'appareil de M. D'Œynhausen peut se faire avec la même levée à toute profondeur.

Contrepoids ou ressort pour équilibrer la partie supérieure des tiges. — L'excursion du levier ou balancier par lequel la sonde est soulevée, dans la manœuvre du battage, doit être limitée, ainsi que nous l'avons dit, de telle sorte que la partie supérieure des tiges continue encore à descendre, lorsque la partie inférieure repose sur le fond, mais d'une distance moindre que le vide *i k* de la coulisse, pour qu'elle ne vienne pas frapper la partie inférieure sur laquelle elle exercerait un choc qui ne servirait qu'à détruire les tiges. On peut équilibrer la partie supérieure des tiges, au moyen d'un contrepoids mobile placé sur le long bras du balancier qui sert au battage, ou au moyen d'un balancier particulier placé au-dessous du premier, et qui, sans être invariablement lié aux tiges, suive cependant leur mouvement alternatif. Il faut faire attention que les contrepoids avec lesquels on équilibre les tiges de suspension, en même temps qu'ils diminuent le travail moteur nécessaire pour soulever la sonde, diminuent aussi la vitesse acquise par la masse totale au moment où elle arrive au bas de la chute. Or l'action des trépans sur la roche est sans doute à peu près proportionnelle à la *force vive* de la masse qui tombe sur la roche, lorsque celle-ci est réduite à une longueur médiocre : si l'on admet ce principe, on en conclura que les contrepoids au moyen desquels on équilibre la partie supérieure des tiges diminuent le rapport de l'effet utile au travail moteur dépensé, et le diminuent d'autant plus, qu'ils agissent à l'extrémité d'un bras de levier plus long.

Soient en effet P le poids de la partie inférieure de la sonde invariablement liée à l'outil, P′ le poids de la tige de suspension supérieure à la coulisse, P″ un contrepoids destiné à équilibrer en partie le poids P′, et placé sur le levier qui sert à soulever la sonde, ou sur un levier particulier dont un des bras suive le mouvement des tiges; R, r les distances respectives des points d'attache du contrepoids P″ et de la tige au point d'appui du levier. Nous négligerons la masse du levier ou du balancier, dans ce calcul qui ne vise point à la précision, mais qui a pour but unique de mettre en évidence le mode d'action des contrepoids.

Si on élève la sonde à une hauteur H, le contrepoids P″ descendra d'une hauteur égale à $H \times \frac{R}{r}$, et le travail moteur dépensé dans la manœuvre sera, abstraction faite des frottements :

$$(P+H')r - P'' \times H\frac{R}{r} = \left(P+P'-P''\frac{R}{r}\right)H.$$

Si l'on désigne par V la vitesse acquise par la sonde quand elle arrivera au bas de la chute H, le contrepoids P″ aura pris une vitesse égale à $V \times \frac{R}{r}$, et la demi-force vive de tout le système sera exprimée en négligeant toujours les frottements, par :

$$(P+P')\frac{V^2}{2g} + P''\frac{R^2}{r^2}\frac{V^2}{2g} = \left(P+P'+P''\frac{R^2}{r^2}\right)\frac{V^2}{2g}$$

g désignant la vitesse acquise par un corps grave tombant librement dans la première seconde de sa chute, que l'on peut prendre égale à 9m,81. D'après le principe des forces vives, la vitesse V est déterminée par l'équation :

$$\left(P+P'+P''\frac{R^2}{r^2}\right)\frac{V^2}{2g} = \left(P+P'-P''\frac{R}{r}\right)H.$$

L'effet utile de la sonde est proportionnel à la force vive du poids P seulement, c'est-à-dire à $P\frac{V^2}{2g}$

Le rapport de cet effet utile au travail dépensé est donc égal à :

$$\frac{P\frac{V^2}{2g}}{\left(P+P'-P''\frac{R}{r}\right)H} = \frac{P}{P+P'+P''\frac{R^2}{r^2}}.$$

Ce rapport diminue, comme on voit, à mesure que le contrepoids P″ et la distance R de ce contrepoids au point d'appui du balancier augmentent. Quand le contrepoids P″ est nul, il devient égal à $\frac{P}{P+P'}$.
Il serait égal à 1, si P′ était nul, c'est-à-dire si les tiges de la sonde étaient toutes invariablement liées : mais alors, ainsi que le démontre l'expérience, la force vive acquise par les parties supérieures de la

sonde, au lieu d'agir utilement sur le fond du trou, n'exerce qu'une action destructive sur les parties de la sonde et les parois du trou.

Au lieu d'appliquer le contre-poids, de telle sorte qu'il diminue l'effort nécessaire pour soulever la sonde, en même temps qu'il soutient la partie des tiges supérieures à la coulisse et l'empêche de venir tomber sur la partie inférieure, après que celle-ci a frappé le fond du trou, on peut le disposer de manière à ce qu'il produise seulement ce dernier effet. Il suffit de terminer le second balancier par une fourchette, dans laquelle glisse librement la tige de la sonde. On dispose un support sur lequel porte le contrepoids, de sorte que celui-ci ne suive pas le mouvement de la sonde, quand on la soulève; lorsque ensuite on la laisse retomber, la partie supérieure des tiges ne doit venir frapper le balancier qu'après que l'outil a déjà frappé le fond du trou; l'effet du contrepoids se réduit alors à détruire graduellement la vitesse acquise par la partie supérieure des tiges, et à prévenir le choc de ces tiges contre les arrêts de la coulisse, ou sur le câble et le levier de battage. Le rapport de l'effet utile au travail moteur développé, se réduit alors dans tous les cas à $\frac{P}{P+P'}$, de même que s'il n'y avait pas de contrepoids. M. Degousée qui s'est empressé d'adopter la division des tiges en deux parties liées par une coulisse, emploie généralement pour équilibrer la partie supérieure des tiges des dispositions analogues à celles que nous venons de décrire en dernier lieu. Kind n'a eu besoin de faire aucune addition à ses engins ordinaires; le ressort de choc en bois dont il fait usage dans tous les cas, suffit en effet pour soutenir la partie supérieure des tiges, pourvu qu'on lui donne une force suffisante, et ce ressort remplace évidemment avec beaucoup d'avantage les contrepoids.

Les tiges de petites dimensions supérieures à la coulisse fonctionnent très-bien dans la manœuvre du battage. Elles n'ont alors qu'à supporter le poids de la tige inférieure, et leur propre poids; un faible équarrissage suffit pour cela, puisqu'on peut sans crainte charger un fer de bonne qualité de 10 à 12 kilog. par millimètre carré; elles n'ont d'ailleurs à résister qu'à une force de torsion très-faible, lorsqu'elles transmettent à l'outil et aux tiges inférieures qui sont soulevées, le mouvement de rotation peu étendu nécessaire dans la manœuvre du battage.

Mais si l'on rencontrait à de grandes profondeurs, au-dessous de bancs durs que l'on a attaqués par percussion, des bancs tendres qu'il fallût percer en rodant, il serait nécessaire de remplacer les tiges de petites dimensions, par les tiges d'un fort équarrissage, et de suppri-

mer la coulisse qui deviendrait sans utilité. Les tiges doivent alors résister à des efforts de torsion considérables. Les emmanchements doivent être très-solides, et il n'est pas douteux que les assemblages à enfourchements ne soient pour ce cas d'un bien meilleur usage que les assemblages à vis.

Dans le forage de 546 mètres de profondeur que M. Mulot a exécuté à l'abattoir de Grenelle, à travers le terrain de craie, il n'a rencontré dans la profondeur, que des bancs d'argile qu'il a attaqués en rodage. Il se servait à cet effet d'une sonde à enfourchement dont les tiges carrées avaient 0m,054 de côté : les tenons engagés dans les fourches avaient 0m,10 de largeur et 0m,20 de longueur, depuis la base jusqu'à l'angle rentrant de la découpure du sommet (voy. *Pl. III*, *fig.* 3). Chaque emmanchement avait trois boulons de 0m,02 de diamètre. Vers la fin du sondage l'enfoncement des tubes de retenue a présenté à M. Mulot beaucoup de difficultés; mais il n'a point eu de rupture de tiges ou d'outils.

Tiges en bois, et composition de la sonde de Kind. — Kind ne s'est pas borné à diviser la tige de sonde en deux parties jointes par une coulisse. Il a en outre augmenté le poids de l'outil, et la section transversale de la tige ou portion de tiges placée en-dessous de la coulisse, en même temps qu'il en diminuait la longueur, de manière à concentrer vers le bas de la sonde le poids qui agit sur la roche par percussion : il a au contraire diminué le poids de la tige supérieure à la coulisse, et qui ne sert qu'à soulever l'outil, et à lui transmettre un léger mouvement de rotation lorsqu'il est soulevé, en remplaçant les tiges en fer d'un faible équarrissage par de longues tiges en bois qui pèsent un peu moins que le volume d'eau qu'elles déplacent dans le trou, de sorte que le poids à soulever par les ouvriers n'augmente point avec la profondeur du trou. C'est pendant les opérations du grand forage de Cessingen, et à la suite de ruptures répétées des tiges en fer, que Kind a été conduit à employer les tiges en bois. La *fig.* 4, *Pl. VI*, représente le trépan de Kind, la tige de ce trépan et la pièce à coulisse qui le joint à la partie supérieure. Les *fig.* 5 A, 5 B, représentent les extrémités de deux tiges en bois et le mode de jonction adopté par Kind. La *fig.* 6, représente le cylindre à soupape employé pour l'enlèvement des boues, et qui est suspendu à la corde par l'intermédiaire d'une coulisse analogue à celle qui réunit les deux parties de la tige de sonde.

On distinguera dans la *fig.* 4, A le trépan à *oreilles* déjà décrit et représenté par les *fig.* 8 et 9, *Pl. III*. B, la *croix* posée sur le som-

met de la tige du trépan (voyez la *fig.* 9, *Pl. III*). C, la tige de sonde proprement dite, *Bohrstange.* D est une pièce mobile le long de la partie supérieure de la tige, qui sert à la fois de guide pour maintenir la sonde verticale et de parachute. E est la coulisse. Celle-ci consiste simplement, comme l'indique la figure, en une pièce de fer bifurquée, entre les branches de laquelle s'engage l'extrémité supérieure et légèrement méplate de la tige C. Dans cette extrémité on a pratiqué une rainure rectangulaire dans laquelle se meut de haut en bas et de bas en haut, une clavette plate en fer qui traverse les deux branches de la fourche et qui est fixée par une contre-clavette, ou simplement rabattue, ou rivée. La tige C, est forgée dans une pièce de fer carrée de 22 pieds de long sur 3 pouces 1/2 d'équarrissage (soit 7 mètres de long sur 0m,095 de côté). On arrondit légèrement les angles; au bas on fait venir à la forge un bourrelet *a*, de 0m,16 à 0m,20 de longueur et de 0m,13 à 0m,14 de diamètre, dans l'axe duquel on fore le trou cylindrique de 0m,11 de profondeur et 0m,08 de diamètre, sur le contour duquel est l'écrou qui reçoit le bout fileté du trépan. Le filet et l'écrou doivent être ajustés avec la plus grande précision possible, afin de conserver la rectitude de l'axe de la tige et du trépan, lorsque les deux pièces sont vissées l'une sur l'autre. A son extrémité supérieure et sur une longueur de 1m,30, la tige est arrondie en un cylindre de 0m,08 de diamètre, autour duquel glisse la pièce mobile D. Celle-ci consiste en six ou sept branches de fer recourbées et liées par leurs extrémités supérieures et inférieures à deux bagues ou anneaux *b b'*, qui peuvent glisser le long de la partie cylindrique, et dont la course est limitée en bas par la saillie *i*, qui sépare la partie cylindrique de la partie prismatique. Enfin, à son extrémité tout à fait supérieure et sur une hauteur de 0m,50, la tige est forgée méplate avec une largeur de 0m,08 sur 0m,034 d'épaisseur. Dans cette partie méplate, on creuse une entaille rectangulaire de 0m,32 de hauteur, au-dessus de laquelle reste encore une épaisseur de fer de 0m,08 jusqu'au sommet de la tige. L'entaille et les branches de la fourchette supérieure E, sont traversées par une clavette plate de 0m,08 de hauteur dans le sens vertical, fixée aux branches de la fourchette. Il résulte de là, que le jeu possible de la clavette dans l'entaille rectangulaire est de 0m,25, ce qui est suffisant.

Le guide D, se compose de deux anneaux ou bagues *b b'*, qui peuvent couler le long de la partie supérieure arrondie ou méplate de la tige, depuis l'embase *i* jusqu'à la fourchette. Ces deux bagues sont liées par six ou sept pièces de fer cintrées, formant une sorte de cylindre à claire-voie, d'un diamètre un peu moindre que celui du trou.

c, est un disque de cuir, ou plusieurs disques de cuir superposés qui remplissent la section totale du trou de sonde. Ce guide remplit une double fonction; il maintient la tige verticale; il sert aussi en quelque sorte de parachute, et prévient le choc de la clavette contre le bas de l'entaille rectangulaire ménagée au haut de la tige. En effet, quand on laisse retomber la sonde après l'avoir soulevée, le guide D ne suit pas dans sa chute la tige qui coule dans les bagues *b*, *b'*, et la partie inférieure de la fourchette rencontre la pièce D, avant que la clavette retombe sur le fond de l'entaille. La pièce descend alors, mais son mouvement est retardé par la résistance de l'eau qui remplit le trou; de sorte que la clavette ne viendrait choquer qu'avec une assez faible vitesse le fond de l'entaille, dans le cas où la partie supérieure des tiges ne serait pas d'ailleurs arrêtée auparavant dans sa chute par l'élasticité de la perche ou ressort de choc établi à la surface du sol. La tige que nous venons de décrire pèse 9 à 10 quintaux (400 à 500 kilogrammes).

Il serait inutile et même nuisible, de donner à l'entaille rectangulaire pratiquée en haut de la tige de sonde plus de 0m,33 de hauteur, et de laisser un jeu de plus de 0m,25 à la coulisse. D'abord l'inutilité est évidente. Les inconvénients possibles résulteraient de ce que l'outil s'accroche quelquefois aux parois du trou. Lorsqu'ensuite la partie supérieure des tiges vient tomber sur le fond de l'entaille, l'outil tombe de tout son poids sur la clavette, et s'il tombait d'une grande hauteur, le choc pourrait déterminer une rupture.

Parachute de Kind. — Le parachute D, suffit quand on fait usage de tiges en bois au-dessus de la coulisse, et qu'il n'y a qu'une seule tige de 7 à 8 mètres de longueur entre la coulisse et l'outil. Mais si les tiges en fer ont une plus grande longueur, on pourra y adapter pour prévenir les ruptures de tiges, le parachute représenté *Pl. VII*, *fig.* 11, qui est également de l'invention de Kind. Il se compose d'un fourreau en tôle *bb*, de 0m,65 de longueur, qui peut se mouvoir en tournant et en glissant sur la portion de tige pleine *d*. A la partie supérieure de ce fourreau est fixé un chapeau formé de deux cuirs très-épais superposés et cousus ensemble; ce cuir présente la forme d'un entonnoir renversé ou d'un parapluie percé d'une ouverture centrale, pour laisser un passage à l'eau. Les bords du cuir sont liés à quatre tiges en fer *ee*, qui sont articulées par leur seconde extrémité au bas du fourreau. Pour que le cuir ne s'use pas trop vite contre la roche, il est armé en dessus de plusienrs lames de fer recourbées *ff*, qui le débordent de plusieurs centimètres. L'excursion du parachute le long de la tige *d* est limitée en haut et en bas par les bourrelets saillants

qui sont aux extrémités de cette tige, ou par des bourrelets particuliers. En supposant qu'une portion de tiges armée d'un semblable parachute se détache par accident et tombe au fond du trou, la résistance que le chapeau de cuir opposera au passage de l'eau, ralentira la chute à tel point, que toute rupture sera rendue impossible. Ce parachute a en outre l'avantage de pouvoir être employé dans des trous à parois fort ébouleuses, attendu qu'il n'arrête pas les fragments de roches détachés des parois. Ceux-ci peuvent en effet passer à côté.

Cylindre à soupape avec tige à coulisse. — Le cylindre à soupape de Kind est suspendu à une tige à coulisse analogue à celle de la sonde, ainsi qu'on le voit *fig.* 6, *Pl. VI*, où A est le cylindre à soupape, B, la tige à laquelle est vissé ce cylindre, et dans laquelle est pratiquée une entaille rectangulaire de 0m,70 de hauteur environ. C, est la fourchette dont les branches sont traversées à leur partie inférieure par la clavette plate qui glisse dans l'entaille précédente. D, est l'anneau tournant ou étrier par lequel l'appareil est attaché à la corde qui s'enveloppe sur un treuil dont l'arbre a 0m,65 de diamètre, et les deux manivelles 0m,44 de rayon. Il arrive souvent que le cylindre à soupape est accroché dans le trou, par des débris tombés de la partie supérieure et qui s'engagent entre lui et les parois. La tige à coulisse BC, facilite son extraction, en permettant de lui imprimer par secousses des mouvements de haut en bas ou de bas en haut, qui déterminent la chute du fragment de roche soit dans le cylindre, soit au fond du trou de sonde. On se sert d'ailleurs de la tige à coulisse BC, pour d'autres usages. Ainsi, nous avons dit que Kind l'employait pour enfoncer le coin de l'arrache-tuyaux, *fig.* 3, *Pl. VII*, en interposant un bout de tige en fer entre l'anneau tournant D, et la tige à coulisse BC, qui se visse sur la tige du coin de l'arrache-tuyaux.

Les *fig.* 5 A et 5 B, *Pl. VI*, représentent les tiges en bois et leur mode de jonction. Les tiges sont en bois de sapin qui doit être parfaitement droit, sans nœuds ni défauts. Elles sont découpées dans des troncs de sapin parfaitement droits et exempts de branches, d'une longueur égale à celle que devront avoir les parties de la tige; celle-ci dépend d'ailleurs de la hauteur de l'engin. Dans le forage exécuté par Kind à Besch sur la Moselle, l'engin était assez haut pour qu'on pût désassembler les tiges par parties de 80 pieds (soit 25 mètres) de longueur. Il donna à chaque tige en bois 40 pieds (12m,50) de longueur. Il fit débiter un tronc de sapin en lattes carrées de 2 pouces (0m,054) de côté, qui furent ensuite arrondies en cylindres de 1 pouce 3/4 (0m,047) de diamètre. Elles étaient liées de la manière suivante:

les deux extrémités de la tige sont emboîtées, *fig.* 5 B, dans des manchons en tôle de 0m,0056 d'épaisseur et 0m,38 de longueur. Ces manchons sont légèrement coniques et évasés vers le haut. L'agrandissement du diamètre est de 1/4 de pouce (0m,00675), depuis l'extrémité étroite où ce diamètre est exactement égal à celui de la tige, c'est-à-dire à 0m,047 jusqu'à l'extrémité supérieure. Pour éviter que la tige ne soit dégradée ou écaillée par le manchon quand on le met en place, le contour inférieur de ce manchon est rendu tranchant en le limant intérieurement, de manière à ce que l'entrée soit évasée en entonnoir. L'extrémité de la tige est ensuite enduite d'huile, et le manchon est chauffé à une température suffisante pour que le bois commence à brûler. Le manchon est enfoncé autour de la tige, l'embouchure étroite en avant, de manière à recouvrir la tige sur une hauteur de 10 pouces (0m,27), et à la déborder par conséquent de 4 pouces (0m,108). Cela fait, on enfonce par en haut, dans l'axe de la tige un long coin pointu en bois de hètre parfaitement sec, et on y chasse ensuite un coin pointu, ou plutôt une aiguille en fer. Il est évident que le manchon se trouve alors fixé à la tige d'une manière tout à fait invariable et parfaitement solide. On enfonce ensuite dans le vide *k* du manchon, l'extrémité *b*, d'une pièce de fer forgé qui est composée de deux parties cylindriques de diamètres inégaux. La queue *b*, a 4 pouces (0m,108) de long et doit remplir exactement le vide qui reste dans le manchon au-dessus de l'extrémité de la tige. Les bourrelets *a*, *a'*, *fig.* 5 A, ont 2 pouces 1/2 (0m,067) de hauteur et 2 pouces (0m,054) de diamètre. Des écrous sont taraudés dans ces bourrelets pour recevoir les extrémités filetées de la pièce de fer J, qui joint les deux tiges. Pour fixer les queues cylindriques *b*, *b'*, des bourrelets dans les manchons en tôle, on fore deux trous cylindriques en croix, distants entre eux de 2 pouces 1/2 (0m,067) environ, à travers le manchon et la pièce de fer qui le remplit, et on chasse dans ces trous des goupilles rondes en fer de 0m,013 de diamètre, que l'on rive aux deux extrémités. La pièce de jonction J, a de 7 à 8 pouces (0m,189 à 0m,216) de longueur, est carrée dans le milieu et porte 0m,02 environ d'équarrissage. Elle est renflée aux deux bouts vers les bases des tenons filetés, afin qu'on puisse y appliquer des clefs et tourne-à-gauche, lorsque l'on veut relever ou descendre la sonde et désassembler les tiges.

Pour rendre le poids des tiges aussi petit que possible, la pièce de jonction J, était remplacée alternativement d'une tige à l'autre, dans le sondage de Besch, par un simple goujon en fer fileté qui réunissait les deux pièces *ab*, *a'b'*, attendu que l'engin ayant 80 pieds de hauteur, permettait de démonter et de remonter les tiges par parties de

Digitized by Google

80 pieds, et par conséquent de laisser toujours deux tiges consécutives réunies l'une à l'autre.

Avantage des tiges en bois d'un faible équarrissage. D'après les dimensions rapportées ci-dessus, le poids des tiges en bois armées, devait être moyennement de 2kil.,20 environ par mètre courant, et la perte de poids dans l'eau était de 0kil.,725 par mètre courant. En conséquence, une ligne de tiges en bois de 400 mètres de longueur, pèserait en totalité 880 kilogrammes environ, et ne pèserait dans l'eau que 590kil.,8, soit 600 kilogrammes. Soit P, le poids de l'outil percuteur y compris la tige en fer; p, le poids total des tiges en bois armées qui servent à soulever l'outil; P' et p', les poids respectifs de l'outil et des tiges dans l'eau. Le travail moteur dépensé par les ouvriers pour soulever la sonde, sera à chaque levée, en négligeant les frottements et la résistance de l'eau

$$(P' + p')\,h,$$

h désignant la hauteur de la levée,

V désignant la vitesse acquise par tout le système au bas de la chute, on aura :

$$(P + p)\,\frac{V^2}{2g} = (P' + p')\,h.$$

L'action destructive de l'outil sur la roche étant supposée proportionnelle à la force vive de l'outil, c'est-à-dire à $P\,\frac{V^2}{2g}$, cette dernière expression représentera l'effet utile correspondant au travail dépensé $(P' + p')\,h$. Or on a :

$$\frac{P\,\frac{V^2}{2g}}{(P' + p')\,h} = \frac{P}{P + p}.$$

Ce rapport est indépendant des poids spécifiques des tiges et de l'outil, et par conséquent de la perte de poids dans l'eau, qui diminue le travail moteur dû à la chute, comme elle diminue le travail moteur nécessaire pour soulever la sonde. On voit qu'il est très-important que le poids total p des tiges soit le plus petit possible; les tiges en bois d'un très-petit diamètre adoptées par Kind, offrent donc un grand avantage;

sous le point de vue de l'économie du travail dépensé, indépendamment de l'avantage plus grand encore qui résulte de ce que les ruptures de tiges, et les accidents de tout genre sont beaucoup moins fréquents qu'avec les tiges en fer, et que les accidents qui surviennent sont en outre beaucoup plus faciles à réparer. Enfin la légèreté des tiges en bois permet de supprimer les engins compliqués, tels que les roues à marches, les cabestans, et de sonder avec le levier simple jusqu'aux plus grandes profondeurs.

Efforts de traction et de torsion qu'on peut faire supporter aux tiges en bois. — Les tiges en bois de sapin sont capables de supporter un effort de traction qui peut être porté jusqu'à 110 ou 120 kilogrammes par centimètre carré de la section transversale. Ainsi pour les tiges dont la section est un cercle de 47 millim. de diamètre, l'effort total de traction peut être poussé sans danger jusqu'à 2,000 kilogrammes, ce qui est plus du double du poids d'une sonde de 400 mètres de longueur, immergée dans l'eau.

Ces mêmes tiges rompraient sous un très-faible effort de torsion. En conséquence il serait impossible de s'en servir, si l'on voulait attaquer le terrain en *rodant* avec des outils analogues à la tarière ou au trépan rubanné. Il paraît que Kind ne fait presqu'aucun usage, dans sa pratique, des outils de ce genre. Il attaque toutes les roches agrégées, quelle que soit leur consistance, avec des trépans, et il enlève les boues et les sables désagrégés, avec le cylindre à soupape. Pour faire apprécier les avantages de sa méthode qui me paraît avoir une supériorité marquée sur tous les autres procédés de sondage, je citerai deux sondages qu'il a exécutés dans le Grand-Duché de Luxembourg, et la Prusse Rhénane.

Sondages exécutés par Kind. Cessingen. — Le sondage de Cessingen près Luxembourg fut commencé le 6 février 1837, et arrêté le 22 mars 1839. Dans ce laps de temps le trou de sonde fut poussé à $534^{m},85$ de profondeur, à travers les roches suivantes.

Calcaire lias.	$62^{m},85$
Grès du Luxembourg.	$83^{m},57$
Marnes sableuses grisâtres.	$25^{m},43$
Marnes du keuper, avec gypses, argiles salifères. . .	$166^{m},00$
Grès moyen.	$8^{m},90$
Marnes du keuper inférieures, avec gypses et argiles salifères	$188^{m},10$
	$534^{m},85$

Le sondage commencé sur un diamètre de $0^{m},30$ conservait au fond

un diamètre de 0m,10. Kind fit usage de tiges en fer, divisées en deux parties par une coulisse, du grand engin avec roue à marches représenté *Pl. VI*, et du cylindre à soupape attaché à une corde, avec tige à coulisse pour enlever les boues.

A la profondeur de 230m,83, le diamètre du trou étant déjà réduit à 0m,26, la nature ébouleuse des parois obligea de descendre une colonne de tuyaux en tôle de 90 mètres de longueur qui ne descendit pas jusqu'au fond.

Le sondage ayant été continué sur un diamètre de 23 centimètres, jusqu'à 238m,70, au milieu d'éboulements incessants, on chercha à retirer la colonne de tuyaux, sans pouvoir y parvenir. On élargit le trou en dessous de la colonne avec les élargisseurs *à coin*, et on parvint ensuite à enfoncer la colonne de tubes de 4 mètres, et à arrêter ainsi les marnes coulantes. On fut néanmoins bientôt obligé de descendre une seconde colonne de 12m,65 de longueur, et de réduire le diamètre du trou à 20 centimètres. A la suite de nouveaux éboulements, on releva cette dernière colonne de tubes, et on put encore enfoncer la première de 5m,34 plus profondément, puis on redescendit la seconde colonne qui avait été prolongée, et avait maintenant 23m,40 de longueur totale. A la profondeur de 245 mètres de nouveaux éboulements forcèrent à extraire pour la seconde fois la dernière colonne; on élargit le trou jusqu'au fond et on redescendit la colonne de tubes extraite. On fut obligé de l'extraire encore, et d'élargir le trou à plusieurs reprises, pour atteindre la profondeur de 277 mètres, en conservant le diamètre de 20 centimètres. Arrivé à ce point, il fallut introduire une troisième colonne de tubes qui avait 15m,24 de long; elle fut descendue au fond, et le trou fut continué sur un diamètre de 16 centimètres 1/2, à travers des marnes et des argiles salifères. De 280 à 300 mètres, on n'eut plus d'éboulement; les marnes et argiles salifères et chargées de gypse et d'anhydrite étaient solides; mais les ruptures de tiges devinrent excessivement fréquentes. A 308 mètres de profondeur, les éboulements recommencèrent; à 315 mètres, on essaya d'introduire une quatrième colonne de tubes. Elle ne put descendre jusqu'au fond du trou. On la releva et on se décida à continuer le forage sur le diamètre de 16 1/2 centimètres. On atteignit, à la profondeur de 336 mètres environ, un banc de grès fort résistant. Après l'avoir percé sur 6 ou 7 mètres, on résolut d'extraire la troisième colonne de tubes, d'élargir le trou jusqu'au banc de grès, et de redescendre cette colonne prolongée jusque sur ce banc. C'est ce qui fut exécuté. La troisième colonne, ayant 72m,77 de longueur totale, fut remise en place, après l'élargissement du trou, et le bas

de cette colonne atteignit la profondeur de 333m,00; on continua à percer le grès sur un diamètre de 16 cent. 1/2. Les éboulements ayant recommencé, en dessous du banc de grès, on descendit une quatrième colonne de tubes qui avait 39m,43 de longueur totale, et qui atteignit le fond du trou à 373 mètres de profondeur. Le forage fut continué sur un diamètre de 13 cent. 1/2. A la profondeur de 401 mètres, il fallut descendre une cinquième colonne de tubes de 34m,28 de longueur totale, et le diamètre du trou fut réduit à 10 centimètres. On continua à forer, et la dureté des bancs de gypse occasionna des ruptures fréquentes de tiges, ce qui suggéra à Kind l'idée d'essayer les tiges en bois. On était alors au mois de janvier 1839, et le sondage avait atteint la profondeur de 470 mètres. Les tiges en bois rendirent immédiatement les ruptures moins fréquentes, quoiqu'on n'en fit usage que pour la partie supérieure de la sonde, et que le mode de jonction de ces tiges entre elles fût loin d'être aussi solide que celui que Kind a adopté depuis. Enfin le trou de sonde avait atteint, le 22 mars 1839, la profondeur de 534m,85 et l'on était en train d'extraire la cinquième et la quatrième colonne de tuyaux, lorsque le défaut de fonds obligea d'interrompre le travail. La dépense totale n'avait pas atteint le chiffre de 110,000 fr., et les deux tiers seulement de cette somme avaient été employés aux travaux directs de sondage.

Forage de Besch. — Le sondage exécuté à Besch sur la Moselle (district de Trèves) fut exécuté avec les tiges en bois à l'aide d'un levier simple, avec ressort de choc, et d'un treuil horizontal. Du 24 juillet 1840 au 15 février 1841, avec 243 journées d'ouvrier de 12 heures chacune, ce sondage atteignit la profondeur de 882 pieds de Paris (286m,50), à travers des bancs de calcaire, de grès et de gypse. La roche ne devint ébouleuse qu'à la profondeur de 867 pieds où on rencontra un banc de sable et gravier coulant, qui obligea de descendre une colonne de tubes, qu'on dut relever par deux fois, pour la prolonger. Le trou avait 0m,16 de diamètre.

Tiges en fer creux. — On a proposé l'emploi de tiges en fer creux, qui joindraient à l'avantage de la diminution du poids, due à la diminution de matière et au grand volume d'eau qu'elles déplaceraient, celui de pouvoir supporter et transmettre des efforts de torsion considérables, et par conséquent de pouvoir servir aussi bien en rodant qu'en battant.

Sous le rapport de la diminution de poids des parties supérieures de la tige, le fer creux n'aura certainement aucun avantage sur le fer plein réduit à de petites dimensions par l'emploi de la coulisse. Il est même facile de voir qu'il y aura plutôt infériorité pour le fer creux,

sous le rapport de l'économie de la force motrice, à cause du plus grand frottement de l'eau contenue dans le trou, tant contre les tiges plus volumineuses que contre les parois. D'un autre côté, le fer creux sera plus cher que les tiges pleines d'un petit diamètre, plus cher *à fortiori* que les simples tiges en bois de Kind. Il ne résistera pas mieux que les tiges en bois à la rupture due aux chocs; il ne lui restera donc qu'un seul avantage particulier, celui de la résistance à la rupture sous un effort de torsion.

Aucune expérience n'ayant encore été faite avec les tiges en fer creux, j'ai dû me borner ici à les mentionner, en indiquant à quoi se réduiraient les avantages qu'on peut espérer de leur emploi, dans le cas où les personnes qui s'occupent de sondages parviendraient d'ailleurs à imaginer un mode d'assemblage convenable, et à rendre leur usage économique et exempt de difficultés pratiques.

Des puits artésiens.

Ainsi que nous l'avons dit au commencement du chapitre, les sondages ont le plus souvent pour but la recherche d'eaux jaillissantes ou montantes de fond jusqu'à une profondeur médiocre au-dessous de la surface du sol.

Sans vouloir traiter ici complètement la question des puits artésiens, pour laquelle nous renvoyons les lecteurs aux ouvrages de MM. Héricart de Thury et Garnier sur l'art du fontainier-sondeur, et à la notice de M. Arago, publiée dans l'*Annulaire du bureau des longitudes* pour 1835, je dois ajouter quelques considérations qui ne peuvent être considérées comme étrangères à l'art des mines.

Napes d'eaux souterraines. Les eaux découvertes par la sonde paraissent provenir de véritables courants souterrains qui circulent dans les vides ou fissures de certaines couches, où elles sont retenues par l'imperméabilité complète, ou relativement beaucoup plus grande des couches immédiatement supérieures. Les couches perméables sont ordinairement composées de sables plus ou moins désagrégés, ou de roches solides calcaires ou autres, pénétrées de fissures très-nombreuses. Dans l'un et l'autre cas, l'eau pénètre, pour ainsi dire, la couche entière, qu'il est impossible de traverser sans lui ouvrir une issue; elle forme une *nappe* d'une grande étendue en tous sens, maintenue par l'imperméabilité des couches supérieures. Celles-ci consistent le plus souvent en argiles compactes. Quand la sonde, après les avoir traversées, pénètre dans la couche aquifère, les eaux s'élancent

dans le trou de la sonde, arrivent quelquefois jusqu'à la surface, où elles forment un jet continu ; d'autres fois, elles se maintiennent dans le trou foré au-dessous de la surface, et doivent être élevées à partir de ce niveau au moyen de pompes établies dans le trou.

Tube ascensionnel destiné à contenir les eaux montantes du fond. — Il n'arrive jamais, ou presque jamais, que toutes les couches que la sonde a traversées, avant de pénétrer dans la couche aquifère, soient imperméables. Une partie des eaux montantes du fond se perdrait donc par filtration dans celles des couches supérieures qui sont perméables ou fissurées, si l'on n'avait le soin de placer dans le trou de sonde un tuyau d'*ascension* destiné à contenir les eaux. Il est nécessaire, pour prévenir toute déperdition, que la base de ce tuyau s'appuie sur la couche imperméable qui recouvre immédiatement la couche aquifère, et qu'il y ait jonction exacte entre le contour extérieur du tuyau et cette couche.

Le bon établissement du tuyau d'ascension est une des conditions essentielles du succès de l'opération, en même temps que l'une des opérations les plus délicates de l'art du sondeur.

Niveau hydrostatique d'un puits artésien. — Ce tuyau, une fois établi, peut être prolongé au-dessus de la surface du sol si cela est nécessaire, de telle sorte que la colonne d'eau ascendante ne puisse plus s'écouler par son orifice supérieur. Elle atteindra alors dans l'intérieur du tuyau un niveau fixe et déterminé, que l'on peut appeler le *niveau hydrostatique* du puits foré. S'il n'y a aucune déperdition d'eau à la base du tuyau d'ascension, il est évident que la hauteur du niveau hydrostatique au-dessous du fond du sondage, sera la mesure exacte de la pression des eaux souterraines en ce point.

Les eaux qui pénètrent la couche aquifère ne sont point stagnantes, ainsi que je l'ai déjà observé ; elles constituent un véritable courant alimenté par les eaux des rivières, des lacs sous lesquels passent les affleurements supérieurs de la couche, ou par les eaux pluviales, et qui se décharge sous forme de sources, aux points les plus bas de ces affleurements, lesquels peuvent se trouver cachés sous le lit des fleuves, ou sous celui de la mer : le lit souterrain du courant est d'ailleurs fort large, mais ordinairement très-encombré, puisqu'il n'est formé que des cavités et des fissures qui pénètrent la couche.

Il résulte de là : 1° que le niveau hydrostatique d'un puits foré est toujours inférieur aux affleurements les plus élevés de la couche aquifère, et supérieur aux affleurements les plus bas de cette même couche ; 2° que ce niveau hydrostatique n'est point tout à fait invariable, puisqu'il dépend des charges d'eau sur les orifices d'alimentation et sur

les orifices d'écoulement de la nappe aquifère, et que ces charges varient avec les crues des cours d'eaux qui recouvrent les affleurements supérieurs ou inférieurs de la couche, avec le niveau des eaux de la mer, lorsque les orifices d'écoulement sont au-dessous de son lit; 3° que le volume d'eau fourni par un puits foré dont le tuyau se terminera au-dessous du niveau hydrostatique, sera toujours plus petit que celui que débiterait un tuyau cylindrique d'une longueur égale à la profondeur du sondage, et de même diamètre que le tuyau d'ascension, sous une charge d'eau égale à la distance verticale de l'orifice au niveau hydrostatique. En effet, les eaux n'arrivent pas librement à la base du tuyau d'ascension, elles éprouvent une résistance qui dépend de la largeur des vides ou fissures, en un mot, du degré de perméabilité de la couche aquifère dans le voisinage des points atteints par la sonde.

Tous les faits généraux observés, sont conformes aux inductions qui précèdent :

M. Baillet de Belloi a observé et signalé depuis longtemps l'influence de la marée sur le puits artésien foré à Noyelle-sur-Mer, dont les eaux s'élèvent au-dessus de la surface du sol à marée haute;

M. Arago, après avoir rappelé ce fait dans sa notice, a rapporté un fait analogue observé sur un puits foré près des bords de la Tamise, qui fournit 363 ou 273 litres d'eau par minute, suivant que la marée est haute ou basse. Il établit ensuite que la cause de l'influence des marées sur les puits artésiens est dans la pression variable avec la marée, des eaux de la mer sur les orifices d'écoulement.

L'infériorité du volume d'eau débité par un puits foré, par rapport au volume que fournirait un tuyau cylindrique de même diamètre et de même longueur que le tuyau d'ascension, sous une charge égale à la distance de l'orifice au niveau hydrostatique, est généralement considérable, et d'ailleurs très-variable, ainsi qu'on pourrait le prévoir.

Divers degrés de perméabilité des couches aquifères. — M. Viollet a essayé, dans un ouvrage sur la théorie des puits artésiens, d'appliquer les formules du mouvement de l'eau dans les conduites à la recherche des volumes d'eaux débités par les puits forés à diverses hauteurs au-dessus du sol, et à la détermination de la hauteur où l'eau sortant du puits est susceptible de fournir le maximum de travail moteur (1).

(1) Le travail moteur est mesuré par le produit du poids de l'eau débitée, et de la hauteur de l'orifice au-dessus de la surface du sol.

Les observations consignées dans le tableau de la page 71 de l'ouvrage cité, et d'autres faits dont je dois la connaissance à M. Degousée, mettent bien en évidence les différences considérables du degré de perméabilité des couches aquifères.

Je citerai quelques faits :

Le puits foré par M. Mulot chez M. Join-Lambert à Elbeuf, d'une profondeur totale de 149m,42, dont le tuyau ascensionnel a un diamètre de 0m,121, a son niveau hydrostatique à une hauteur de plus de 21m,67 au-dessus du sol; car le tuyau coupé à ce niveau fournit encore 0li.,58 d'eau par seconde ou 34li.,8 d'eau par minute. Au niveau du sol, le volume d'eau débité par le puits est seulement de 3li.,47 pas seconde, ou 208li.,2 par minute.

Or la charge d'eau nécessaire pour qu'un tuyau de 149m,42 de longueur et d'un diamètre de 0m,121 débite 3li.,47 d'eau par seconde, se compose 1° de la hauteur génératrice, de la vitesse de sortie; 2° de la hauteur perdue par les résistances dans le parcours du tuyau.

La vitesse d'écoulement est ici égale à

$$\frac{0,00347}{0,7854 \times \overline{0,121}^2} = 0^m,3017.$$

La hauteur génératrice de cette vitesse est

$$\frac{\overline{0,3017}^2}{19,62} = 0,00464.$$

La hauteur perdue par le frottement dans le parcours du tuyau est donnée par la formule (Traité d'hydraulique de M. d'Aubuisson)

$$0,0003425 \times \frac{4 \times 149,42}{0,121}\left(\overline{0,3017}^2 + 0,055 \times 0,3017\right) = 0,1821.$$

La somme de ces hauteurs est seulement 0m,1867, tandis que la distance de l'orifice au niveau hydrostatique est de plus de 21m,76.

Il paraît que l'eau de ce puits a pu s'élever jusqu'à 30m au-dessus du sol.

Le puits foré par M. Degousée à la caserne de cavalerie, à Tours, dont la profondeur totale est de 128m,32 et dont le tuyau ascensionnel a un diamètre intérieur de 0m,11, a son niveau hydrostatique à 18m,00 au-dessus du sol. Le produit de ce puits, au niveau du sol, était, immédiatement après le forage, de 1500 litres par minute. La hauteur d'eau capable de produire le débit d'un pareil volume, par un tuyau

de même longueur et diamètre que le puits foré, calculée comme précédemment, est de 11^{m},63 ; elle est à peu près les deux tiers de la distance de l'orifice au niveau hydrostatique. La partie de la couche aquifère atteinte à la caserne de cavalerie de Tours, est donc plus facilement perméable qu'à Elbeuf; cependant, les eaux se trouvent également aux deux endroits cités dans les sables verts inférieurs au terrain de craie.

Je citerai encore les exemples suivants :

Le premier puits foré à Soisy-sous-Étiole (Seine-et-Oise), par M. Degousée, a atteint, à la profondeur de 55^{m},65, la couche aquifère des sables inférieurs à l'argile plastique du terrain de Paris. Le tuyau d'ascension a 0^{m},067 de diamètre, et le niveau hydrostatique s'est élevé à 4^{m},87 au-dessus du sol. On a eu :

Au niveau du sol,	400 litres d'eau par minute.
A 0^{m},66 au-dessus	133
A 1^{m},20.	106
A 1^{m},45.	96
A 1^{m},80.	80
A 2^{m},00.	68
A 3^{m},00.	40

Le puits foré à l'hôpital militaire de Lille, par M. Degousée, a atteint l'eau contenue dans les fissures du calcaire carbonifère recouvert à Lille par le terrain crétacé, à la profondeur de 107 à 120 mètres. Ce puits a reçu un tuyau de 0^{m},11 de diamètre. Le niveau hydrostatique est à 2^{m},40 au-dessus du sol. Il fournit :

Au niveau du sol	400 litres d'eau par minute.
A 1^{m},00 au-dessus	250
A 1^{m},60.	140
A 1^{m},90.	90
A 2^{m},05.	60
A 2^{m},30.	30
A 2^{m},35.	20
A 2^{m},30.	01

Le puits foré à l'abattoir de Grenelle a atteint à la profondeur de 546 mètres les sables verts inférieurs au terrain de craie. Aussitôt que la sonde a pénétré dans ces sables, l'eau a jailli avec impétuosité jusqu'à la surface du sol. Le produit, au niveau du sol, a été d'environ 3000 litres par minute ; le tube d'ascension n'était point encore mis en place.

Digitized by Google

Détermination du niveau hydrostatique et jaugeages. — Il est très-utile de déterminer le niveau hydrostatique d'un puits foré, aussitôt qu'on a mis en place le tuyau ascensionnel, et de jauger exactement les volumes d'eau que fournit le puits à diverses hauteurs au-dessus du sol. Le moyen le plus simple de déterminer le niveau hydrostatique, est de prolonger le tuyau ascensionnel, jusqu'à la hauteur où les eaux cessent de dégorger; on peut fixer les parties supérieures du tuyau aux montants de la chèvre de sondage. Dans le cas où le niveau serait assez élevé pour que la prolongation de la colonne présentât des difficultés, on pourrait suppléer à l'observation directe, en bouchant avec un tampon, à sa partie supérieure, le tuyau ascensionnel que l'on mettrait en communication avec la cuvette d'un manomètre à mercure, ainsi que l'a proposé M. l'ingénieur des mines Sagey (1). Le manomètre est un instrument assez simple pour qu'on puisse l'improviser presque partout. Il est d'ailleurs facile de construire des manomètres d'une pose et d'un transport faciles qui pourraient être à l'usage particulier des sondeurs.

Quant aux jaugeages, le mieux est de les exécuter directement, en interrompant le tuyau ascensionnel à diverses hauteurs au-dessus du sol, et en le terminant par une cuvette en bois, dont le fond soit traversé par le bout du tuyau; la cuvette ouverte sur une face verserait l'eau dans une caisse de capacité connue d'avance. Je ne connais pas de puits artésiens qui fournissent plus de 58 litres d'eau par seconde, et ce volume n'est pas assez considérable pour qu'on soit obligé de recourir à des moyens indirects, dont le résultat laisse toujours de l'incertitude: dans la détermination du niveau hydrostatique et des volumes d'eau débités par le puits foré, à diverses hauteurs au-dessus du sol, il faut attendre longtemps, si l'on veut être sûr d'avoir des résultats exacts, parce que l'état de stabilité des pressions et de la vitesse de l'eau est très-lent à s'établir. On conçoit facilement la cause de ce phénomène, et quant au fait en lui-même, il est mis hors de doute par les observations de tous ceux qui se sont occupés des puits artésiens. Je citerai à ce sujet les observations faites par M. Viollet sur le puits réparé de M. Champoiseau à Tours. Le tuyau du puits était ouvert le 15 mai 1839 à $0^m,50$ au-dessous du sol, et cet état durait depuis un temps très-long, de sorte que la vitesse d'écoulement avait

(1) Note sur le jaugeage des puits artésiens par M. Sagey (Ann. des Mines, t. III, 4e série p. 347).

certainement atteint l'état d'uniformité ou de régime. Le 16 mai à onze heures et quart du matin, on éleva l'orifice à 5m,75 au-dessus du sol; l'écoulement fut d'abord complètement arrêté; l'eau reparut au bout d'un quart d'heure, et la vitesse n'arriva à l'uniformité que 54 heures après l'exhaussement. On abaissa l'orifice d'un mètre; le volume d'eau augmenta à la suite de cet abaissement, et continua d'augmenter pendant 6 heures.

Augmentation du produit d'un puits artésien avec le diamètre et la profondeur du puits. — Le volume d'eau fourni par un puits foré augmente, toutes choses égales d'ailleurs, avec le diamètre de ce puits. Cet accroissement est dû, d'abord, à la diminution des résistances de l'eau dans le tuyau ascensionnel où elle circule avec une vitesse plus petite, quoique le débit soit plus grand. Il peut aussi provenir de l'augmentation du diamètre du trou, dans la couche aquifère, lorsque celle-ci n'est point ébouleuse, parce que l'augmentatiou du diamètre a agrandi le débouché par lequel les eaux de la couche affluent vers le trou de sonde. Cette dernière cause peut avoir surtout une grande influence, quand la couche aquifère est un banc solide, mais fissuré. Elle serait évidemment d'une bien moindre importance, si cette couche était formée de sable sans cohésion. Un autre moyen d'accroître le volume des eaux d'un puits foré, alimenté par une nappe contenue dans une couche fissurée et non ébouleuse, est l'approfondissement du trou de sonde dans la couche aquifère. Cet approfondissement découvre de nouvelles fissures, de nouveaux canaux d'alimentation. A cela il faut ajouter que les eaux contenues dans une couche aquifère, sont quelquefois comme divisées en plusieurs nappes superposées, par des assises dures, peu ou point perméables, d'une faible épaisseur. Ces nappes sont probablement alimentées par des sources communes, et communiquent entre elles, dans l'étendue de leur cours souterrain, tout en demeurant distinctes sur de grandes distances. Dans ce cas la découverte d'une nappe inférieure peut augmenter énormément le volume d'eau. C'est ce qui paraît être arrivé au puits foré à Tours chez M. Champoiseau. Ce puits, foré d'abord par M. Degousée jusqu'à la profondeur de 167m,33 et mnni d'un tuyau ascensionnel de 0m,14 de diamètre inférieur, avait fourni 1608 litres d'eau par minute au niveau du sol. Le volume d'eau ayant éprouvé des diminutions successives, M. Champoiseau se décida à faire extraire le tuyau ascensionnel et à faire réparer son puits. M. Mulot, chargé de cette réparation, continua l'approfondissement du puits jusqu'à 212m,66; il avait alors traversé probablement tout le terrain des sables verts inférieurs à la craie, formé de couches alternatives de sables et de grès

dur d'une petite épaisseur. Après le tubage qui suivit cette réparation, le produit du puits fut de 3480 litres par minute, au niveau du sol. Le puits réparé avait reçu un tuyau ascensionnel de $0^m,277$ de diamètre. L'agrandissement du diamètre du tube concourait ici avec l'approfondissement du puits.

Lorsque les couches aquifères sont formées de sables ou de galets isolés, un trou de sonde foré sur un point quelconque jusqu'à la couche, sera suivi de l'ascension des eaux de la nappe dans le puits foré. Le succès dépendra donc uniquement de l'existence de la couche au-dessous du point où le forage aura été entrepris. Si la couche aquifère est au contraire une couche de roche solide, mais fissurée, le succès du sondage dépendra encore de la rencontre des fissures dans lesquelles circulent les eaux souterraines, et de deux puits très-voisins l'un de l'autre, l'un pourra avoir un succès complet, tandis que l'autre sera sans communication avec les eaux souterraines.

Influence mutuelle des puits rapprochés les uns des autres. — Lorsque l'on creuse un nouveau puits foré dans le voisinage d'un puits préexistant, le second puits peut influer d'une manière sensible sur le volume d'eau que débite le premier. Toutefois cette influence ne paraît pas s'étendre à de grandes distances, ou du moins elle s'affaiblit rapidement, si elle ne s'annule pas complètement, à mesure que la distance augmente. M. Viollet rapporte qu'il existe une influence réciproque très-sensible entre les puits forés à Tours, chez MM. Tessier et Champoiseau, qui sont situés à 50 mètres de distance l'un de l'autre. Cette influence serait encore appréciable entre des puits forés dans la même localité, et distants de 200 mètres.

Puits absorbants. — Lorsque le niveau hydrostatique d'un puits foré est au-dessous de la surface du sol ou, plus exactement, de son orifice supérieur, ce puits absorbe les eaux que l'on verse par cet orifice, et qui trouvent un écoulement dans la couche aquifère inférieure. Ces sortes de puits sont appelés puisards absorbants ou boitouts. Le volume d'eau qu'un semblable puisard peut absorber dépend de la perméabilité de la couche aquifère et de la pression artificielle que l'on détermine en exhaussant le niveau de l'eau dans le puits. Dans plusieurs carrières de pierres à bâtir situées au sud de Paris, on a pu se débarrasser des eaux, en forçant au sol de ces carrières des puits absorbants que l'on a prolongés à travers les argiles plastiques jusqu'aux bancs supérieurs de la craie, qui sont fissurés et donnent écoulement aux eaux.

On rencontre très-fréquemment dans les forages exécutés à travers des terrains stratifiés, des nappes superposées, séparées l'une de

l'autre par des assises imperméables. Ces nappes n'ont pas le même niveau hydrostatique, et ce sont généralement les nappes supérieures dont le niveau hydrostatique est le moins élevé; ce niveau est souvent au-dessous de la surface du sol, tandis que les nappes inférieures donnent lieu à des eaux jaillissantes au-dessus de la surface. Les couches aquifères supérieures absorberaient donc une partie plus ou moins considérable des eaux montantes du fond, si le puits n'était pas soigneusement tubé. On a aussi rencontré des nappes ABSORBANTES au-dessous d'autres nappes donnant lieu à des eaux *jaillissantes*. Il pourrait donc arriver que la rencontre d'une nappe inférieure à celle qu'un puits foré a déjà découverte, absorbât en partie les eaux supérieures, et diminuât le niveau hydrostatique du puits. Toutefois il est probable que cette nappe absorbante serait séparée des premières par une couche imperméable bien caractérisée.

Principes généraux sur les puits artésiens. — Il résulte des considérations générales qui précèdent :

1° Qu'on ne doit point entreprendre de forages, pour rechercher des eaux montantes de fond ailleurs que dans des terrains stratifiés.

2° Que les niveaux hydrostatiques des différents puits alimentés par une même nappe ou une même couche aquifère seront d'autant plus élevés, que ces puits seront plus éloignés des orifices d'écoulement de la nappe, et plus rapprochés des orifices d'alimentation ; il s'agit ici bien entendu de la hauteur du niveau hydrostatique au-dessus d'un plan horizontal fixe, ou du niveau moyen de la surface de la mer, et non de la hauteur du sol.

3° Les orifices d'alimentation comme les orifices d'écoulement sont d'ailleurs répartis sur des lignes fort étendues. Les puits forés dans le voisinage des affleurements d'une couche aquifère ne fournissent en général qu'un fort petit volume d'eau, parce qu'ils ne sont alimentés que par une étendue médiocre des affleurements.

4° Les puits forés les plus abondants sont ceux qui étant alimentés par des couches aquifères d'une grande étendue, aboutissent en des points situés à une grande profondeur, et où la matière de la couche est facilement perméable.

Tubage des puits artésiens. — L'une des opérations les plus importantes et les plus difficiles du sondage, est, comme je l'ai déjà indiqué, l'établissement du tuyau d'ascension. Ces tuyaux sont en bois, en tôle de fer ou de cuivre, en fonte, et quelquefois en ferblanc ou en zinc.

Tuyaux en bois. — Les tuyaux en bois sont certainement les meilleurs de tous, sous le rapport de l'économie et de la durée. Ils ont

l'inconvénient grave de diminuer notablement le diamètre intérieur du puits foré à cause de l'épaisseur qu'il faut leur donner et qui ne peut être au-dessous de 3 à 4 centimètres. Ils sont formés de billes de bois d'aune, d'orme ou de chêne bien droites, sans nœuds ni défauts, rabotées extérieurement, et forées au diamètre intérieur que doit avoir le tube d'ascension. Les tuyaux partiels aussi longs qu'on a pu les obtenir avec les billes qu'on a à sa disposition, sont assemblés entre eux à mi-bois par emboîtement. Le joint peut être garni intérieurement d'étoupes ou d'une étoffe de laine goudronnée. Il est consolidé extérieurement par des bandes de fer minces appliquées dans le sens de la longueur, et que l'on peut noyer dans l'épaisseur du bois. Ces bandes sont clouées aux deux tuyaux contigus et recouvertes par des frettes en fer. Les tuyaux contigus peuvent aussi être réunis par un manchon en tôle qui recouvre le joint extérieurement, et qui est cloué sur le bois dans l'épaisseur duquel il est noyé. Un tuyau d'ascension en bois a une durée indéfinie et n'exige aucune réparation. M. Arago cite le tubage en bois du puits artésien de Lillers, qui dure depuis plus de 700 ans. Le tuyau extérieur en chêne qui déborde le sol, est la seule pièce qn'on ait jamais eu besoin de réparer.

Tuyaux en fonte, en tôle, en cuivre, en zinc, etc. — Les tubes en fonte sont assemblés à emboîtement et à vis, ou simplement à tabatière, avec recouvrement de 8 à 9 centimètres de hauteur; les deux parties qui se recouvrent sont percées de trous taraudés correspondants, dans lesquels on passe des vis qui ne doivent pas faire saillie dans l'intérieur. Les tubes en fonte paraissent d'un meilleur usage que les tubes en tôle de fer, parce qu'ils s'oxydent moins rapidement.

Les tubes en tôle de fer ou de cuivre, ou en zinc, sont assemblés au moyen de manchons, comme les tubes de retenue que nous avons déjà décrits.

On fixe les manchons aux deux tuyaux contigus, au moyen de vis, puis on soude à l'étain le manchon anx tuyaux, en plaçant autour du tuyau et au dessous de l'assemblage, un réchaud annulaire. M. Degousée recommande de placer, pendant cette opération, dans l'intérieur du tuyau, au-dessous de l'assemblage, un fort tampon de filasse, pour éviter que la soudure coule dans l'intérieur et y fasse des bourrelets. Les tubes en tôle de fer ont ordinairement une épaisseur de 4 à 5 millimètres; les tuyaux en cuivre rouge, une épaisseur de 3 millimètres. L'expérience a montré que les tubes en tôle de fer sont assez promptement altérés par l'oxydation, même dans le cas où les eaux montantes du fond sont sensiblement pures. Ils éprouvent une oxydation locale, en certains points où probablement une action électro-chimique est déterminée par le contact de corps de diverses

natures, et sont bientôt perforés comme avec un emporte-pièce. Ce fait a été observé sur des tubes en tôle de 9 millimètres de diamètre, placés dans un des puits de Tours, où les eaux sont cependant comparables pour la pureté, aux meilleures eaux potables. Les tubes en cuivre rouge, ou en bronze, ne sont point détruits par l'oxydation, comme les tuyaux en tôle de fer. Ils méritent donc la préférence sur ceux-ci. Comme on leur donne d'ailleurs une épaisseur beaucoup moindre (2 à 3 millimètres), le prix d'un tubage en cuivre n'est guère que la moitié en sus du prix du tubage en fer, bien que le rapport des prix du cuivre et du fer soit au moins de 2 à 1.

Les tubes en fer-blanc ont été employés en Angleterre. Ils sont rapidement détruits par l'oxydation.

Les tubes en zinc peuvent être avantageux, lorsque les eaux sont sulfureuses; M. Degousée a employé à Enghien-les-Bains des tubes en zinc de 8 à 10 millimètres d'épaisseur.

En résumé, on peut employer le tubage en bois dans les puits forés dont le diamètre est assez considérable, et le produit assez faible pour que le rétrécissement qui résultera de l'épaisseur des tubes, n'augmente pas trop les résistances de l'eau dans sa circulation ascendante. Sauf les inconvénients qui résultent du rétrécissement du puits, le tubage en bois réunit toutes les conditions désirables d'économie, de solidité et de durée. L'emploi des tubes en fer devient de plus en plus rare, à cause de la destruction rapide par oxydation. Les tubes en fer fondu ont le même inconvénient, quoique à un degré moindre. On leur donne d'ailleurs plus d'épaisseur qu'aux tubes en tôle, et leur poids peut donner lieu à des ruptures et autres accidents lors de la mise en place.

Les tubes en zinc conviennent pour les eaux sulfureuses.

Les tubes en cuivre ou en bronze sont ceux dont il convient de faire usage, dans les puits profonds dont le forage a nécessité de grandes dépenses, et dont on a par conséquent intérêt à conserver le produit sans diminution et sans altération.

Écrasement accidentel du tube du puits de l'abattoir de Grenelle. — L'emploi des tubes en tôle galvanisée, c'est-à-dire recouverte avec du zinc, serait peut-être avantageux, sous le rapport du prix et de la durée. Le puits foré de l'abattoir de Grenelle, à Paris, est le seul qui ait été garni d'un tube ascensionnel en tôle galvanisée. On y avait d'abord introduit un tube en cuivre, qui fut écrasé accidentellement vers le tiers de la profondeur du puits à partir de la surface. Cet écrasement, dont je ne connais aucun autre exemple, a eu probablement pour cause l'obstruction momentanée des conduits

souterrains par lesquels l'eau ascendante arrivait au trou de sonde. Le tuyau ascensionnel s'étant alors vidé d'eau, le tube a pu être écrasé par la pression des eaux extérieures contenues entre lui et les parois du trou.

Établissement du tube ascensionnel. — Quels que soient au reste les tubes dont on voudra faire usage, le point difficile est le bon établissement de la colonne dans le puits. Les tuyaux d'ascension ne sont point destinés, comme les tubes de retenue, à soutenir les parois du trou. Celles-ci doivent être préservées des éboulements, soit par leur nature solide, soit par des tubes de retenue qu'on abandonne dans le trou, après que le forage est terminé, quand cela est nécessaire. Le but des tuyaux d'ascension est uniquement de recueillir les eaux de la couche aquifère, et de prévenir leur déperdition, par les fissures des couches perméables que la sonde a traversées avant d'arriver à la nappe alimentaire; pour cela il est nécessaire que la colonne ascensionnelle soit assujettie par sa base dans la couche imperméable qui recouvre la nappe, et cette liaison du tuyau à la couche imperméable est le point difficile de l'opération. Si cette couche est solide, et si la nature du terrain perforé est connue d'avance par des sondages antérieurs, le moyen le plus sûr paraît être de ménager, sur les bords du trou, dans le banc solide, un siége sur lequel repose la base du tube ascensionnel. Pour cela, quand le sondeur voit qu'il est arrivé tout près de la nappe aquifère, il continue le trou sur un diamètre un peu plus petit, et fore sur ce dernier diamètre ce qui reste à percer du banc solide ainsi que la couche aquifère. Quand l'opération du forage est terminée, le tube est descendu dans le trou, à la manière des tubes de retenue, si ce n'est qu'on laisse assez de jeu, pour que le tube descende librement. Il a un diamètre suffisant pour s'arrêter sur la banquette annulaire ménagée pour recevoir sa base. Lorsqu'il est ainsi mis en place, il reste à l'assujettir, et à garnir le vide existant entre les parois du trou et le contour extérieur du tube, dans toute la hauteur. C'est à quoi l'on parvient, en coulant dans l'espace annulaire un bon béton que l'on foule fortement. On peut même, quand le terrain est bien connu, descendre d'abord le tube d'ascension, et n'achever le forage, sur un petit diamètre, qu'après sa mise en place et sa consolidation. C'est ainsi que M. Degousée a opéré dans le puits de l'abattoir de Tours, et ce procédé nous paraît excellent, quand il est possible d'en faire usage. On pourrait aussi l'employer dans un terrain qui ne serait pas connu d'avance, en élargissant le trou dans le banc imperméable supérieur à la couche aquifère avant de placer le tube d'ascension, si cet élargissement n'était

Digitized by Google

pas rendu trop coûteux, ou même impossible par l'introduction antérieure de tubes de retenue.

Si le banc imperméable supérieur à la couche aquifère, est un banc d'argile tendre, comme cela arrive souvent, on fera descendre le tube ascensionnel jusqu'à la couche aquifère, et on pourra l'appuyer sur le bord supérieur du tube de retenue qu'on aura dû enfoncer en dernier lieu, pour soutenir la couche argileuse. Il suffira pour cela de fixer extérieurement sur le tube d'ascension, et à une distance de sa base égale à celle qui existe entre les bords supérieurs du tube de retenue enfoncé en dernier lieu, et la couche aquifère, une bague saillante dont le diamètre extérieur soit compris entre le diamètre du tube de retenue inférieur, et le diamètre du tube immédiatement supérieur, dans l'intérieur duquel le tube inférieur a dû passer. Cette bague peut être un tampon de bois conique extérieurement, fixé autour du tube ascensionnel par des viroles en cuivre, ou par tout autre moyen, et qui viendra poser sur le tube de retenue en pénétrant dans son intérieur par la petite base du tronc de cône. Le tube de retenue est de son côté assujetti par la pression du terrain que nous supposons argileux, et par conséquent le tuyau ascensionnel sera soutenu par sa base. Toutefois on ne l'abandonnera à lui-même qu'après avoir coulé du béton dans l'espace annulaire compris entre le contour du tuyau ascensionnel et les parois du trou, dans toute la partie supérieure. Une fois que le béton a fait prise c'est lui qui maintient en place le tuyau ascensionnel. J'indique l'usage d'un tampon en bois, parce qu'il me paraît propre à prévenir l'action électrochimique qui naîtrait du contact du cuivre des tubes d'ascension, et de la tôle de fer des tubes de retenue, action qui aurait pour résultat la destruction de ceux-ci, et qui pourrait donner lieu à des éboulements de la marne argileuse.

Si le tube d'ascension était en bois, il suffirait de donner aux tuyaux un diamètre extérieur plus grand que celui du dernier tube de retenue et de le terminer en bas par un tronc de cône qui pénétrât dans ce tube.

On conçoit du reste que les procédés devront varier suivant les circonstances, qui suggéreront à un sondeur habile des moyens particuliers d'assujettir le tube ascensionel, de manière à prévenir autant que possible les déperditions d'eau.

Diminution du volume d'eau de quelques puits artésiens. Causes possibles de cette diminution. — J'ai dit que le volume d'eau fourni dans l'origine par certains puits artésiens avait beaucoup diminué avec le temps. D'autres puits au contraire ont conservé le même volume d'eau pendant des siècles. La diminution de produit peut pro-

venir soit de l'obstruction des canaux souterrains qui conduisent l'eau de la nappe au trou de sonde, ou du trou de sonde lui-même, soit des déperditions d'eau qui ont lieu à la base du tuyau ascensionnel, ou à travers ses parois, quand il vient à être endommagé, soit enfin de ce que les eaux de la nappe ont trouvé une issue plus facile que celle qui leur était ouverte, à l'époque du forage, ou de ce que leur volume a diminué.

L'obstruction des canaux souterrains peut être le résultat d'éboulements intérieurs dans la couche aquifère, qui auraient eu pour résultat d'encombrer les canaux d'arrivée. En général, cette obstruction n'est qu'accidentelle et momentanée. Il suffit souvent, pour la faire cesser, de produire des variations brusques dans le mouvement de la colonne d'eau ascendante. On peut à cet effet boucher imparfaitement le tuyau avec un cylindre de bois semblable à un piston de pompe, et le retirer brusquement, ou bien faire jouer dans le tuyau, avec une grande vitesse, un véritable piston de pompe garni d'un clapet. Si c'est le trou de sonde qui est obstrué, on le vide en y introduisant la sonde armée d'une tarière, ou autres instruments appropriés.

La déperdition d'eaux qui aurait lieu par suite du défaut de jonction du tube ascensionnel avec les bancs supérieurs à la couche aquifère, ou par des avaries survenues dans la hauteur de ce tube, n'a d'autre remède que la réparation complète du trou, qui est quelquefois aussi difficile et aussi chère que le creusement d'un puits neuf. Il faut extraire le tube mal assujetti ou détérioré, et lui en substituer un autre, ce qui exige presque toujours l'élargissement du trou de sonde, dans une grande partie de sa profondeur.

Quant aux pertes résultant de ce que les eaux de la nappe aquifère auraient trouvé une autre issue naturelle plus facile, ou auraient elles-mêmes subi une diminution, on conçoit à la rigueur que de pareils faits soient possibles, mais ils doivent être excessivement rares et je n'en connais aucun exemple bien constaté. On comprend que lorsque je parle de nouvelle issue plus facile, j'exclus les issues pratiquées artificiellement, comme le seraient de nouveaux trous de sonde qui verseraient leurs eaux à un niveau plus bas. Ici la cause de diminution du produit est toute simple, mais encore faut-il répéter que jusqu'ici l'expérience n'a fait reconnaître l'influence de puits forés les uns sur les autres que pour des distances assez petites et qui n'excèdent pas 200 mètres.

Quand le produit d'un trou de sonde vient à diminuer, on peut reconnaître si la diminution provient de l'obstruction des canaux sou-

terrains ou du trou de sonde, ou si elle est due une déperdition d'eau, pourvu que l'on sache quel était dans l'origine le niveau hydrostatique du puits foré.

Si le niveau hydrostatique s'est abaissé, en même temps que le produit a diminué, on peut affirmer que la cause de la diminution est une déperdition d'eau.

Si au contraire le niveau hydrostatique était demeuré invariable, la diminution de produit devrait être évidemment attribuée à l'obstruction des canaux souterrains ou du trou de sonde lui-même; car le rétrécissement des canaux par lesquels l'eau arriverait, ne l'empêcherait pas de s'élever au même niveau dans le tube, lorsque l'écoulement serait supprimé. Cette observation a été faite par M. l'ingénieur des mines Sagey, qui en conclut avec juste raison, l'utilité de déterminer le niveau hydrostatique, et les volumes d'eau fournis à diverses hauteurs au-dessus du sol, par les puits forés.

On a exprimé la crainte que l'augmentation de pression résultant de la plus grande élévation de l'eau dans le tube ascensionnel, nécessaire pour la détermination du niveau hydrostatique, ne soit une cause de destruction ou d'avarie du puits foré. Il faudrait, pour que cette crainte fût fondée, que l'accroissement de pression sur la base de la colonne ascendante, à laquelle donne lieu la prolongation de celle-ci jusqu'au niveau hydrostatique, fût une fraction assez considérable de la pression qui a lieu, dans le cas ordinaire où le tuyau est interrompu à quelques mètres au-dessus du sol. Comme il en est rarement ainsi, je pense qu'il n'y a, dans la plupart des cas, aucun inconvénient à pousser la pression, au moins pendant la durée de l'expérience, jusqu'à cette limite, pourvu, toutefois, qu'on élève progressivement l'orifice du tube ascensionnel, par petites portions successivement ajoutées à ce tube, de manière à éviter des variations rapides de pression sur la base de la colonne.

De quelques sondes particulières.

Sonde du tourbier. — L'on se sert fréquemment, pour l'exploration du sous-sol, à de très-petites profondeurs au-dessous de la surface, de petites sondes appropriées à la nature du terrain et des substances que l'on recherche. Ainsi, le tourbier se sert d'une sonde terminée par une tarière d'un petit diamètre et dont la tige en fer est divisée en parties égales dont la distance est égale à la hauteur que l'on donne, dans le pays, aux *pointes* de tourbe (*voy.* plus loin l'exploitation de la

tourbe). Il enfonce chaque fois la tarière d'une profondeur égale à une division de la tige, et détermine ainsi l'épaisseur des terres de recouvrement, puis l'épaisseur du banc de tourbes en *pointes*, et la quatité du banc à chaque profondeur.

Sonde usitée à Autray pour la recherche des minerais de fer. — Dans les environs d'Autray, près de Gray (Haute-Saône), il existe à une profondeur qui n'excède guère 15 à 20 mètres un dépôt abondant de minerai de fer en grains, recouvert par des terres argileuses. Ce dépôt est exploité depuis un temps immémorial au moyen de puits d'un petit diamètre autour desquels on creuse des galeries ou tailles dans le gîte. On ne s'étend ainsi qu'à de petites distances du puits, on fait ébouler les galeries en se retirant vers ce puits que l'on comble ensuite, ou qui s'éboule naturellement. Avant d'entreprendre le creusement d'un puits semblable, on s'assure par un sondage, si le dépôt de mineral de fer existe à l'endroit où l'on a l'intention de le creuser. On fait usage à cet effet d'une petite sonde, formée de tiges de fer rond d'un centimètre 1/2 de diamètre, assemblées à vis. La tige inférieure se termine par un renflement dont le diamètre excède celui des assemblages de la sonde, et qui est lui-même terminé par une pointe aiguë. Deux hommes enfoncent cette petite sonde dans le terrain, en battant, jusqu'à la profondeur où doit exister le dépôt de minerai. Le trou n'a pas besoin d'être vidé. Les terres sont simplement refoulées. Quand la pointe de la sonde atteint le niveau où doit se trouver le minerai de fer, celui-ci laisse sur le bourrelet une tache dont la couleur suffit pour indiquer son existence à l'endroit du sondage.

Sonde de l'architecte. — On emploie quelquefois, pour reconnaître la nature d'un sol qui doit recevoir les fondations d'un édifice, une barre de fer pointue de 7 à 8 centimètres de diamètre, que l'on enfonce à coups de mouton. Sur le contour de la barre et dans toute sa hauteur sont ménagées de petites cavités équidistantes que l'on remplit de cire, et dont un bord est saillant de quelques millimètres sur le contour cylindrique du corps de la barre. Lorsque celle-ci est enfoncée, on la tourne avec un manche analogue à celui d'une sonde, dans le sens convenable pour que les bords saillants des cavités mordent dans le terrain. La cire est expulsée et remplacée par la matière des couches traversées. Ce mode d'exploration est extrêmement imparfait, et il vaut beaucoup mieux employer une petite sonde ordinaire qui fore sur un diamètre de 6 à 7 centimètres au plus. C'est aussi ce que l'on fait généralement aujourd'hui pour les études préliminaires des tracés de canaux, de chemins de fer, etc.

Usage de la sonde dans l'intérieur des mines. — La sonde est fré-

quemment employée dans l'intérieur des mines; elle sert à rechercher des gîtes parallèles au gîte exploité, à établir une communication entre des travaux séparés par des massifs de roche d'une épaisseur médiocre, qu'il serait inutile ou même nuisible de traverser par des galeries, à reconnaître le terrain dans lequel on s'avance, pour s'assurer contre les amas d'eaux, ou de gaz nuisibles qui pourraient être renfermés dans de vieux travaux, ou même dans des cavités naturelles.

Les sondages dans l'intérieur des mines sont ordinairement peu profonds, si l'on excepte toutefois les forages verticaux que l'on fait quelquefois au fond des puits pour explorer le terrain inférieur. Ceux-ci s'exécutent comme les sondages partant de la surface; ils sont même plus faciles et moins coûteux, parce que l'on se sert d'un engin ou d'un simple treuil, placé sur l'orifice du puits, pour la manœuvre et l'extraction de la sonde que l'on retire ainsi par parties d'une grande longueur.

Les trous de sonde destinés à établir des communications souterraines entre deux groupes de travaux, ou à reconnaître le terrain en avant de soi, doivent être exécutés dans toute sorte de directions.

Si la communication que l'on perce a pour but de faire écouler des eaux d'une galerie plus élevée dans une galerie inférieure, ou si elle doit servir à la circulation de l'air nécessaire à l'aérage, il sera souvent nécessaire que le diamètre soit un peu grand.

Les trous de sonde destinés à reconnaître le terrain, pour s'assurer contre le danger des lacs souterrains ou des mofettes, doivent être faits sur le diamètre le plus petit possible, parce qu'il est ainsi plus aisé de les tenir bouchés au besoin, et qu'on peut d'ailleurs en percer de nouveaux, quand on veut ouvrir une issue plus large aux eaux ou aux gaz irrespirables.

Sondages intérieurs à la recherche de vieux travaux remplis d'eau ou de gaz irrespirables. — Ces trous sont presque toujours exécutés dans l'épaisseur du gîte exploité; ainsi, dans l'exploitation de la houille, lorsqu'on a des motifs de soupçonner que les galeries ou tailles d'exploitation sont dirigées du côté d'anciens travaux abandonnés et remplis d'eau, on se fait précéder par plusieurs trous de sonde percés en avant de la taille, dans le plan de la couche; ces trous sont placés au front de la taille et dans les angles Les premiers sont dans la direction même de l'axe de la taille ou galerie; les seconds sont dirigés obliquement à cet axe, de façon à s'assurer que les parois latérales ont une épaisseur suffisante pour que les eaux ne puissent pas faire irruption dans la mine.

Supposons, par exemple, que le chantier d'exploitation, ABCD,

fig. 27, *Pl. IX* soit poussé dans la direction *xy*, qu'il ait une largeur de 4 mètres, et que l'avancement journalier soit d'un mètre. On s'assurera contre les vieux travaux, en tenant constamment deux trous de sonde *ab*, *cd* poussés à égale distance de l'axe du chantier, parallèlement à cet axe, et laissant entre eux un intervalle de 2 mètres. Deux autres trous Be, Cf seront poussés dans les angles, dans le même plan que les premiers, et dans des directions formant des angles de 45° avec l'axe de la galerie.

Après la fin de la journée des ouvriers qui abattent la houille, les ouvriers chargés du sondage entreront dans la mine. Ils prolongeront les deux trous en front *ab*, *cd* d'une longueur égale à l'avancement de la taille, pendant la journée, et perceront de nouveaux trous à 45° dans les angles. La profondeur totale des trous devra être plus ou moins considérable suivant la solidité de la houille, et la pression des eaux dont on soupçonne l'existence. Cette pression dépend de la profondeur du chantier au-dessous des galeries d'écoulement, ou du niveau des eaux dans les puits de la contrée. Sa limite supérieure est toujours bien connue. En général, une épaisseur de houille de 3 mètres au plus suffit pour contenir les eaux, et dans ce cas, la profondeur totale des trous en front serait de 4 mètres, pour qu'elle fût encore de 3 mètres, après la journée du lendemain. En donnant aux trous Be, Cf, percés dans les angles, une profondeur de 4 mètres, leur extrémité sera écartée de $2^m,82$ des parois de la galerie; on sera donc assuré qu'il n'existe aucune ancienne cavité à une distance moindre que $2^m,82$. B'e', C'f' sont les trous percés sur les angles dans la journée précédente. Quatre trous, dont deux en front et deux dans les angles, suffisent pour procurer une sécurité complète dans les couches de houille dont l'épaisseur n'excède pas 2 mètres : mais dans les couches puissantes, où on a pu pratiquer plusieurs étages de travaux, il faut encore sonder au faîte, ou au sol du chantier, ou au faîte et au sol en même temps, suivant que le chantier suit le mur, le toit de la couche, ou se trouve écarté de l'un et de l'autre. Il faut, du reste, éviter de pratiquer des tailles qui ne s'appuient ni sur le toit, ni sur le mur.

Les tiges des sondes employées à ces travaux sont en fer rond, d'un diamètre de 1 centimètre et demi à 2 centimètres et demi au plus : elles sont courtes, assemblées à vis. L'outil le plus usité pour forer dans la houille est un petit ciseau de 3 à 3 et demi centimètres de large; on se sert quelquefois dans la houille tendre, de la langue de carpe ou serpiat, ou d'un petit trépan rubanné, *fig.* 14, *Pl. III.*

La sonde est manœuvrée à bras par deux hommes.

Digitized by Google

Quand le trou est creusé horizontalement, ou en montant légèrement, et que la roche laisse suinter de l'eau qui tient le trou constamment humecté, le nettoyage du trou se fait facilement avec une petite tarière, et même avec une simple curette consistant en une tige de fer terminée par un crochet aplati, dont le plan est perpendiculaire à la tige.

Si la roche est sèche et dure, les trous creusés dans une direction horizontale ou ascendante sont d'une exécution difficile, parce que les outils n'étant pas humectés se détrempent rapidement. Le forage des trous inclinés en descendant offre moins de difficulté, parce qu'on les tient remplis d'eau. Il est d'ailleurs rare que l'on exécute des forages profonds dans des directions horizontales ou inclinées, et par conséquent que l'on ait besoin d'avoir recours à des engins, pour la manœuvre de la sonde qui deviendrait fort embarrassante, pour peu que la profondeur du trou fût considérable.

Appendice sur le mode d'assemblage des tronçons de tube de retenue en tôle au moyen de rivets.

Nous avons décrit le procédé usité par M. Degousée pour assembler sur place les tronçons de tubes de retenue en tôle qui composent la colonne entière que l'on descend dans un trou de sonde. Beaucoup de sondeurs, et Kind entre autres, emploient, pour réunir ces tronçons, des rivets au lieu de boulons à vis. Il faut alors introduire dans les tuyaux un appareil particulier pour pouvoir former à l'intérieur les têtes des rivets. La *fig.* 5, *Pl. VII*, représente l'appareil dont Kind s'est servi dans le sondage de Cessingen.

Il se compose de deux pièces en fer *a a* de forme demi-cylindrique, et de 0m,11 de hauteur. Ces pièces sont liées à des tiges de 0m,60 de longueur réunies à leur sommet par une charnière *c*; l'une des tiges se prolonge en dessus de la charnière et se termine par un pas de vis qui sert à fixer l'appareil aux tiges de la sonde. Entre les pièces demi-cylindriques *a a* se loge un coin e muni d'une tige terminée aussi par un pas de vis qui s'adapte à une autre tige de sonde. Une portion de la colonne étant déjà introduite dans le trou, et suspendue à l'aide du collier en bois, *fig.* 4, *Pl. VIII*, le tronçon que l'on veut ajouter étant mis en place dans le manchon supérieur qui termine la colonne, et tourné de manière que les trous du manchon et du tronçon de colonne se correspondent, on descend dans l'intérieur de la colonne la pièce A fixée à l'extrémité d'une tige de sonde de longueur convenable, attachée à la corde de l'engin, et l'on amène les pièces *a a* en face de la ligne circulaire des trous correspondants. On écarte ensuite ces deux pièces en enfonçant entre elles le coin *e* fixé à l'extrémité d'une autre

tige qui est suspendue à la corde du cylindre à soupape. Il en résulte que les pièces *a a* remplissent presque tout le vide intérieur du tuyau; on met alors en place les boulons destinés à former les rivets, lesquels s'appuient contre les pièces *a a* intérieurement, tandis qu'on les rive à l'extérieur à coups de marteau. Ces boulons se rivent ainsi par les deux extrémités, comme les rivets usités dans la chaudronnerie ordinaire.

Digitized by Google

CHAPITRE III.

MOYENS D'ENTAILLER ET D'ATTAQUER LES ROCHES.

Outils du mineur. — Les outils du mineur varient avec la nature de la roche ou du terrain. Dans les terres meubles telles que la terre végétale, les glaises, les marnes tendres, il emploie les mêmes outils que l'agriculteur, des pioches ou des pics qui sont généralement lourds et à pointe assez obtuse.

Pour les substances très-tendres, molles, qui sont susceptibles de faire corps, comme les tourbes, il se sert d'un outil tranchant analogue à la bêche du jardinier, mais qui est garni d'un ailerón pour qu'il coupe sur deux faces à la fois, ce qui facilite le détachement du morceau de tourbe séparé de la masse par l'outil. Cet instrument porte le nom de louchet, *fig.* 20, *Pl. IX.* L'ouvrier tourbier emploie encore, suivant les circonstances, quelques outils qui sont exclusivement à son usage et que nous décrirons à l'article de l'exploitation des tourbes.

Les substances tendres sont très-nombreuses. Elles comprennent les argiles compactes, plus ou moins endurcies, qui forment souvent des bancs puissants à la surface du sol, et se trouvent aussi assez fréquemment dans les filons; les sables agglutinés, beaucoup de dépôts d'alluvion, des roches de grès, granitiques, porphyriques ou autres analogues qui ont été altérées dans leur structure ou leur composition chimique par l'action des agents atmosphériques; la houille, beaucoup de matières de filons. Le mineur les attaque ordinairement avec le pic, des leviers, des coins ou des aiguilles en fer plus ou moins longues, qu'il enfonce à coups de masse. Le pic, *fig.* 1 et 2, *Pl. IX*, est un instrument terminé d'un côté par une pointe aciérée, de l'autre par un œil dans lequel entre le manche. Celui-ci a une longueur d'environ 8 décimètres. L'outil en fer a une longueur et une grosseur variables suivant la nature de la roche et l'usage qu'on veut en faire. Dans les roches assez homogènes et tendres, telles que la houille, le mineur creuse ordinairement un sillon profond dans une certaine partie de la

masse qu'il veut abattre. C'est ce qu'il appelle *haver*. Il emploie pour cela un pic plat, léger, très-aigu et très-court. Souvent le pic est double. L'œil destiné à recevoir le manche est au milieu, et il se termine de part et d'autre par une pointe. Cet outil porte à Anzin et à Mons le nom de *rivelaine*, *fig.* 3 et 4, *Pl. IX*. Il est commode en ce qu'il n'est pas très-lourd, et que le mineur a deux pointes à émousser avant de le renvoyer à la forge. Le manche a une longueur variable suivant la profondeur de l'entaille que l'on creuse, et chaque pointe a de 0m,20 à 0m,30 de longueur. Dans les roches plus dures telles que les grès décomposés, lorsque l'ouvrier doit creuser un fossé ou sillon, et frapper de haut en bas, le pic est plus gros, plus lourd, à manche plus long, à pointe plus obtuse. Le poids du pic aide alors l'ouvrier.

Dans les argiles mêlées de cailloux ou de substances dures, la pointe du pic est également plus obtuse et l'outil plus gros.

Abattage des terres argileuses. Havage. — Les aiguilles et coins sont enfoncés à coups de masse dans la roche qu'on a déjà entamée au pic, pour l'abattre par grandes parties. Ces aiguilles sont plus ou moins longues suivant la profondeur de l'entaille que l'on a faite préalablement, et aussi suivant la distance de cette entaille au point où on enfonce les aiguilles. Par exemple, si l'on veut déblayer des terres argileuses qui recouvrent un gîte, pour l'exploiter à ciel ouvert, on coupe ordinairement les terres à pic sur une hauteur aussi grande qu'on peut le faire, sans s'exposer à des éboulements immédiats. Cette hauteur dépend du degré de cohésion des terres. On pratique ensuite avec le pic, à la base de l'escarpement et sur toute l'étendue du front, une entaille horizontale qui met les terres en surplomb. On appelle cela *haver*. L'entaille du *havage* a plus ou moins de profondeur, suivant la cohésion des terres, que l'on soutient provisoirement avec des cales en bois ou en pierre, ou en laissant subsister de distance en distance, de petits massifs de terre en forme de piliers. Cela fait, les ouvriers se retirent du pied de l'escarpement, et pour abattre les terres sapées en dessous, on enfonce à la surface une file de coins en fer ou en bois armé de fer, disposés parallèlement au front de l'escarpement. On détermine ainsi des éboulements de grandes masses de terres dont la cohésion se trouve presque entièrement détruite, et que l'on n'a plus qu'à charger dans des brouettes ou chariots de déblaiement.

Il arrive fréquemment des accidents dans les travaux du genre de ceux que nous venons d'indiquer, parce que les ouvriers payés à prix fait manquent de prudence, coupent les terres à pic sur une hauteur trop grande, ou poussent trop loin l'entaille horizontale. Il est

essentiel que, pendant ce dernier travail, un ou deux ouvriers placés en dessus observent si les terres ne se fendent pas, pour avertir à temps les travailleurs de se retirer.

Abattage de la houille. — Dans la houille, on have généralement suivant un plan parallèle à celui de la couche, et qui s'étend sur toute la largeur du front de la taille. On have au sol ou au milieu de la hauteur de la taille. On choisit ponr cela des lits plus tendres que le reste de la masse, tels que de petits lits d'argiles schisteuses qui se rencontrent fréquemment dans les couches. On fait ensuite une coupure sur chaque côté de la taille, on ôte les cales de soutien si on en a placé de semblables, et on abat la masse coupée, en enfonçant plusieurs coins ou aiguilles en fer dans un plan parallèle et supérieur au plan de l'entaille de *havage*. Quand on a havé à une certaine hauteur au-dessus du sol, on détache ordinairement la banquette de houille qui reste sur le sol, en enfonçant une série de coins disposés dans un plan vertical à la partie postérieure de cette banquette. Quelquefois l'action des coins ou aiguilles est remplacée dans la houille par celle de la poudre.

Dans l'exploitation des filons, l'entaille de havage se fait dans les lits d'argile tendre, quand il y en a de tels. Les salbandes des filons sont souvent favorables à ce travail. Le havage est aussi employé dans les roches stratifiées, comme les pierres calcaires, le grès, exploité pour pierres à bâtir. Ici on se sert beaucoup de pinces ou d'aiguilles que l'on enfonce dans les fissures de stratification.

Pointerolle. — Les substances dures sont attaquées avec la pointerolle ou par le feu. La pointerolle, *fig.* 6, *Pl. IX*, est un outil de fer fortement aciéré ou entièrement en acier, terminé d'un côté par une pointe en pyramide quadrangulaire, de l'autre par une face plane. Au milieu est un trou rectangulaire destiné à recevoir un manche en bois très-court, qui n'est pas fortement assujetti, et qui ne sert qu'à diriger l'outil. L'ouvrier applique la pointe de cet outil sur le point de la roche qu'il veut entailler, et frappe sur la face plane avec un marteau à manche très-court, terminé par deux faces planes (*Schlägel*), *fig.* 7, *Pl. IX*; la longueur de la pointerolle varie de $0^m,10$ à $0^m,16$: elle est plus courte dans les roches les plus dures. Chaque mineur emporte avec lui quand il commence sa journée, une ou deux trousses composées chacune de douze pointerolles, *fig.* 5, *Pl. IX*, réunies par une ficelle ou une courroie de cuir qui passe par les ouvertures rectangulaires. Leurs pointes s'émoussent vite, et il faut en avoir plusieurs de rechange; le marteau pèse de 2 à 3 kilogrammes ; il est plus léger quand le mineur doit travailler au-dessus de sa tête.

La pointerolle est un outil allemand. Antérieurement à l'emploi de

la poudre dans les mines, on n'avait pas d'autre outil pour exécuter des galeries très-longues dans les roches les plus dures. Aujourd'hui l'on s'en sert encore dans les roches dures, sur les points où on veut faire dans le roc des entailles régulières, comme celles qui doivent recevoir les extrémités de pièces de bois destinées à supporter des colonnes de pompe ou autres appareils, et dans les endroits où l'on ne peut employer la poudre, parce que les éclats de pierre pourraient endommager une machine ou un boisage voisin; on en fait usage, concurremment avec la poudre, pour détacher les éclats de rocher fendillés par les pétards ou coups de mines, pour abattre toutes les parties pleines de druses où la poudre ferait peu d'effet, pour dépouiller des gîtes et préparer l'emplacement des trous de mines, ou les fentes destinées à recevoir les coins.

La pointerolle est plus utile dans les filons que dans les roches homogènes et dures. Dans celles-ci, on emploie de grands coins aciérés, *fig.* 18, *Pl. IX*, que l'on enfonce à coups de masse dans les fentes produites par l'action de la poudre ou dans les fentes naturelles de la roche. On se sert aussi de leviers, barres en fer, ou pieux fesant levier, pour enlever les parties fendillées et détachées par les pétards. Les mineurs anglais du Cornwall ne font guère usage de la pointerolle allemande.

Tirage à la poudre. — L'emploi de la poudre dans les travaux des mines, date du commencement du XVII[e] siècle, de l'année 1613 environ. Pour faire sauter les rochers à la poudre, on perce un trou cylindrique dans la roche au moyen de l'outil appelé *fleuret* ou *pistolet;* on introduit au fond de ce trou, une quantité de poudre de mine variable suivant la position du trou, la profondeur, la masse de rocher qu'on veut faire sauter : on remplit ensuite la partie du trou qui est au-dessus de la poudre, avec une bourre fortement tassée, en laissant sur un des côtés un petit canal destiné à porter le feu à la poudre.

Le fleuret dont on se sert pour percer le trou cylindrique, est ordinairement une tige en fer rond, *fig.* 8, *Pl. IX*, terminée par un ciseau, ou taillant en biseau plus ou moins obtus, fortement aciéré, et trempé plus ou moins dur, suivant la dureté de la roche. La longueur du fleuret dépend de la profondeur qu'on veut donner au trou. On frappe sur la tête avec un marteau ou une masse, et à chaque coup de marteau on tourne le fleuret d'un sixième ou un huitième de circonférence. Lorsque le trou est incliné vers le bas, et que la roche est sèche, on y jette de temps en temps un peu d'eau, pour empêcher l'outil de se détremper; on enlève aussi de temps en temps les boues

avec une curette qui est une petite tige en fer, terminée par une espèce de cuiller recourbée, *fig.* 9, *Pl. IX.*

On change assez souvent d'outil pour creuser un même trou, et quelquefois on emploie des outils d'un diamètre décroissant à mesure que le trou s'approfondit.

A ciel ouvert et dans les grandes excavations, deux hommes sont fréquemment employés à creuser le trou de mine; l'un tient le fleuret et le tourne, l'autre frappe sur la tête avec une masse qui pèse trois à quatre kilogrammes.

Dans l'Erzgebirge, pour le travail à deux hommes, on emploie trois fleurets des dimensions suivantes :

	Longueur.	Diamètre.
Fleuret préparatoire.	0,414	0,04
Intermédiaire.	0,828	0,034
Dernier.	1,912	0,030

La roche est un gneiss très-dur.

Au Hartz, où la roche consiste en grauwacke et schiste argileux, on emploie trois fleurets des dimensions suivantes :

	Longueur.	Diamètre.
Fleuret préparatoire.	0,672	0,042
Second.	0,915	0,036
Troisième.	1,000	0,036
Dernier.	1,152	0,031

Le maillet a un manche en bois de 0m,648, et la masse en fer pèse à peu près 4 kilogrammes. On pratique dans ces deux localités des trous dont la profondeur est de 0m,576 à 0m,864 (Richesse minérale).

En Angleterre, le travail à deux hommes est assez usité dans les filons d'étain où la roche est compacte et excessivement dure; les trous que l'on creuse ainsi, ont de 1 pied 9 pouces à 2 pieds (0,53 à 0,61) de profondeur, et 1 pouce 3/4 à 2 pouces (0,04 à 0,05) de diamètre. (La méthode allemande est probablement favorable à l'économie de la poudre).

Le travail à un homme est plus usité dans les mines d'Allemagne et de France; il est exclusivement employé dans les creusements de puits, de galeries et toutes les excavations de petites dimensions. Les outils employés à l'Erzgebirge et au Hartz ont les dimensions suivantes;

ERZGEBIRGE.

	Longueur.	Diamètre.
Premier fleuret.	0,276	0,023
Second	0,460	0,017
Dernier	0,736	0,014

On pratique des trous dont la profondeur varie de $0^m,41$ à $0^m,46$.

AU HARTZ.

	Longueur.	Diamètre.
Premier fleuret.	0,408	0,03
Deuxième	0,60	0,024
Troisième	0,768	0,022

Le maillet a un manche en bois de $0^m,346$ de long et pèse environ 3 kilog. On perce des trous qui ont de $0^m,43$ à $0^m,56$ de longueur.

Dans les mines de sel de Northwicb (Cheshire) on emploie une tige en fer longue de 7 à 8 pieds renflée au milieu en forme de fuseau, et terminée aux deux bouts par un ciseau tranchant très-aigu, *fig.* 14, *Pl. IX*. Pour enlever les gradins inférieurs de sel, l'ouvrier saisit cette tige par le milieu et fore dans le sel un trou vertical ou très-incliné en faisant danser l'outil comme une sonde, et sans frapper dessus. Dans les carrières de plâtre des environs de Paris, on fore dans la roche de gypse, avec une espèce de tarière à mèche qui est représentée *fig.* 12, *Pl IX*, et qui agit en tournant.

Quelle que soit la méthode employée pour forer le trou, il faut, avant d'introduire la poudre, le sécher, s'il est humide. A cet effet, après l'avoir nettoyé des boues et débris de roche, on entoure la curette d'étoupes sèches, qui enlèvent l'eau par imbibition. S'il arrive de l'eau autour du trou on construit une espèce de digue annulaire pour l'empêcher d'y tomber. Le trou étant séché, on place dedans la charge de poudre. Cette charge varie depuis 50 grammes pour le petit tirage et les trous peu profonds, jusqu'à 500 grammes et plus pour le grand tirage. La poudre est enveloppée dans du papier, quand le trou est sec; dans de la toile goudronnée, s'il est extrêmement humide; dans un étui de ferblanc ou un sac en tissu couvert d'un enduit imperméable, si le tirage se fait sous l'eau. Dans le cas le plus ordinaire l'enveloppe est du papier ; on ne doit jamais verser la poudre dans le trou, comme quelques mineurs ont l'habitude de le faire, même quand le trou est parfaitement sec. On pousse la cartouche au fond avec le bourroir qui est une tige ronde en fer portant une canelure sur le côté, ou bien, ce qui vaut mieux, avec une tige en bois cylindrique et exclusivement destinée à cet usage. On fiche ensuite dans la cartouche sur le côté du trou l'épinglette, *fig.* 11, *Pl. IX*. C'est une tige en fer ou en cuivre terminée, d'un côté, par un anneau, et de l'autre, par une pointe. L'épinglette ne doit pénétrer dans la poudre que jusqu'à moitié de la hauteur qu'elle occupe et être éloignée du fond du trou. On tasse ensuite

Digitized by Google

avec le bourroir, *fig.* 10, sur la cartouche, jusqu'à l'orifice du trou, de l'argile préparée, des morceaux de brique, ou des débris de schiste tendre, en ayant bien soin de ne pas frapper sur l'épinglette. L'ouvrier, pendant le bourrage, tourne de temps en temps celle-ci sur elle-même, pour qu'il puisse ensuite l'arracher avec plus de facilité. Elle demeure d'ailleurs logée dans la canelure du bourroir. L'ouvrier la retire, quand le trou est plein, en passant le bourroir dans l'anneau de la tête, et tirant dessus. Le canal qu'elle laisse est destiné à porter le feu à la poudre.

L'amorçage se fait de plusieurs manières.

On se sert souvent d'un tuyau de paille rempli de poudre fine; la paille est coupée au-dessous d'un nœud et forme ainsi un tuyau creux bouché à l'une de ses extrémités. On place ce tuyau à la partie supérieure du petit canal ménagé par l'épinglette, le bout fermé étant dirigé vers le bas; on l'y fixe avec un peu d'argile; on y adapte une mèche soufrée dont une des extrémités aboutit à son orifice; l'ouvrier met le feu à l'autre bout; il se retire et se met à l'abri des effets de l'explosion, pendant le temps que le feu met à se propager d'une extrémité à l'autre de la mèche. La poudre dont le tuyau est rempli prenant feu, celui-ci est repoussé jusqu'au fond du canal par la réaction des gaz qui se développent et porte le feu à la poudre.

Disposition des trous de mines. — Le choix de l'emplacement des trous de mine, la profondeur à leur donner, et la dose de poudre dont on les charge ne peuvent être l'objet de règles bien précises, et sont généralement abandonnés à l'expérience des ouvriers, qui n'est bien souvent qu'une routine sans intelligence. Cependant, les ouvriers un peu exercés savent tous que le travail à la poudre doit être conduit de manière à tenir la roche dégagée sur une ou deux des faces latérales, et que les axes des trous doivent être généralement dirigés à peu près par la face latérale libre la plus rapprochée de la charge de poudre. La plus courte distance de la poudre à la face dégagée de la roche, on ce qu'on peut appeler la *ligne de moindre résistance*, est ainsi dirigée suivant une ligne à peu près perpendiculaire à l'axe du trou; les surfaces de rupture déterminées par l'action des gaz de la poudre passent alors en général par l'axe du trou qui éclate jusqu'au fond. Par exemple, si on veut faire disparaître des rochers faisant saillie au-dessus d'un plan LM, et dont le profil soit tel que ABCD, *fig.* 16, *Pl. IX*, une série de trous de mine inclinés, tels que mn, $m'n'$, $m''n''$, seront plus efficaces que des trous verticaux.

Dans le creusement d'un puits vertical dont le fond sera suivant un plan horizontal, ou d'une galerie dont le fond sera suivant un plan normal aux parois et à l'axe de la galerie, le mineur commencera

par percer un trou de mine très-incliné sur le plan de la face à attaquer. L'explosion de la poudre dont ce premier trou sera chargé, ne détachera qu'un volume assez faible de la roche; mais il déterminera une dépression autour de laquelle on disposera les trous de mine suivants qui produiront beaucoup plus d'effet.

Les mineurs savent aussi profiter des fissures de stratification ou autres qui existent dans la roche. Ainsi, dans les roches stratifiées, ils font en sorte que les axes des trous de mine soient parallèles aux plans de stratification, parce qu'ils savent que la roche casse plus facilement dans la direction perpendiculaire à ces plans, que suivant toute autre.

Doses de poudre. — C'est relativement à la quantité de poudre nécessaire pour charger les trous de mines, que l'expérience pratique des mineurs est le plus ordinairement en défaut; la plupart proportionnent tout simplement la dose de poudre à la profondeur du trou, de telle sorte que la poudre remplisse une fraction déterminée, un tiers, par exemple, ou un quart de cette profondeur; une pareille règle appliquée sans avoir égard à la nature de la roche, et même à la position du trou par rapport aux parois dégagées, et à son diamètre, n'a évidemment rien de rationnel. Le major général sir J. F. Burgoyne, dans un mémoire récent sur le tirage des rochers à la poudre, conseille de suivre la règle suivante : en supposant qu'une roche ait une égale ténacité dans tous les sens, les charges de poudre à employer devront être proportionnelles aux cubes des lignes de moindre résistance, qui, dans ce cas, ne sont autre chose que les plus courtes distances de la charge aux faces dégagées de la roche.

Ainsi, dans les carrières de granite de Kingstown près Dublin, les charges de poudre exprimées en onces avoir-du-pois, étaient prises égales à la moitié des cubes des lignes de moindre résistance exprimées en pieds anglais, sans avoir égard à la profondeur des trous.

Voici le tableau des lignes de moindre résistance et des charges de poudre correspondantes calculé d'après cette règle, et traduit en mesures françaises :

Lignes de moindre résistance en mètres.	Charges de poudre en grammes.
0,305	14
0,610	112
0,914	378
1,220	906
1,524	1.750
1,829	3.024
2,134	4.802
2,438	5.254

Digitized by Google

La charge de poudre exprimée en grammes est égale à 529 fois le cube de la ligne de moindre résistance exprimée en mètres. Cette règle revient à peu près à la suivante, qui est exprimée par des rapports en nombres plus simples : *La charge de poudre en grammes est égale à la moitié du cube de la ligne de moindre résistance exprimée en décimètres.*

Le général Burgoyne dit que les charges calculées d'après la règle précédente, suffisent dans le granite non fissuré, et où aucun défaut de la roche ne vient en aide à l'action des gaz de la poudre, qui est d'ailleurs de la poudre de mines du commerce de qualité ordinaire : il estime en conséquence qu'elles seraient suffisantes dans des roches de ténacité ordinaire, et qu'elles pourraient être diminuées dans beaucoup de cas. La règle ne s'appliquerait pas d'ailleurs généralement au cas où la roche ne serait dégagée que sur une seule face, comme cela a lieu, par exemple, au fond de puits en creusement, ou à l'avancement de galeries. On pourra la suivre dans les travaux de carrières à ciel ouvert, et les creusements des galeries à très-grande section, où la roche est entaillée en forme de gradins ou de banquettes, dont chacune est dégagée sur deux faces au moins, la face supérieure et la face antérieure.

Accidents, *et précautions à prendre pour les prévenir*. — L'opération du tirage à la poudre, surtout dans les roches dures, qui étincellent sous le choc de l'acier, exige des précautions particulières dont l'omission occasionne trop souvent des accidents très-graves : le coup peut partir pendant l'opération du bourrage, parce qu'une étincelle déterminée par le choc ou le frottement des outils en fer ou en acier contre les parois du rocher, ou contre la matière de la bourre, fait jaillir une étincelle qui met le feu à la poudre ; d'autres fois le coup tarde à partir, et le mineur, qui revient trop tôt vers le trou, peut être victime de son imprudente précipitation ; enfin, la maladresse d'un mineur qui ajuste mal la mèche soufrée, ou apprécie mal la longueur qu'il doit lui donner, pour avoir le temps de se mettre à l'abri des éclats de rocher, occasionne aussi quelquefois des accidents.

Matières employées pour bourrer. — Nous devons insister particulièrement sur les mesures de précaution propres à prévenir l'inflammation de la poudre, pendant l'opération du bourrage. La première de toutes consiste à n'employer pour bourrer que des matières tout à fait exemptes de parties quartzeuses. Le gypse, la baryte sulfatée exempte de quartz, le tuileau peu cuit et surtout l'argile sont les matières que l'on emploie le plus fréquemment. Lorsque la roche est très-quartzeuse, il est prudent de faire préparer d'avance des boudins

d'argile bien exempts de quartz, dont le mineur emporte la provision nécessaire pour la journée. Dans la plupart des mines de houille, on se sert de l'argile schisteuse tendre, qui constitue habituellement plusieurs assises du terrain houiller.

Épinglettes en cuivre. — L'épinglette en fer est la cause la plus ordinaire de l'inflammation de la poudre : elle est en effet appliquée contre la roche, et peut faire jaillir des étincelles en frottant contre les parois du trou, soit quand on la tourne sur elle-même pendant le bourrage, soit au moment où l'ouvrier veut la retirer; elle peut aussi être entraînée par le bourroir, et sa pointe, par suite d'un coup de marteau mal appliqué, peut venir frapper le fond du trou.

On évite ce danger en substituant à l'épinglette en fer des épinglettes en cuivre, ou plutôt en un alliage de cuivre et d'étain, contenant à peu près 1/12 d'étain, qui a beaucoup plus de dureté que le cuivre : l'épinglette peut être entièrement en cuivre et l'anneau supérieur en fer; celui-ci est soudé à l'épinglette, ou mieux fixé par de petits rivets brasés sur l'extrémité supérieure de la tige que l'on a aplatie. D'autres fois la partie inférieure et pointue de l'épinglette, sur une longueur de $0^m,16$ à $0^m,20$, est seule formée de l'alliage de cuivre et d'étain, et soudée à la partie supérieure de la tige qui est en fer doux. La première méthode paraît préférable; elle est usitée dans la plupart des districts de mines de la Prusse.

Les ouvriers repoussent les épinglettes en cuivre comme n'ayant pas assez de solidité, et on est en effet obligé, pour qu'elles offrent une résistance à la rupture et une rigidité suffisantes, de les faire plus grosses que les épinglettes en fer, ce qui augmente le diamètre du petit canal ménagé à travers les matières de la bourre, et diminue par conséquent l'effet des gaz de la poudre sur la roche.

Moyens de supprimer l'épinglette. Étoupilles de sûreté de Bickford. — Dans les mines du comté de Cornwall, on se servait autrefois assez fréquemment, pour porter le feu à la cartouche, d'une suite de tuyaux de plumes d'oie remplis de poudre fine légèrement tassée et entrant les uns dans les autres; cette ligne de tuyaux était enfoncée par son extrémité dans la charge de poudre et appliquée contre les parois du trou; elle tenait la place de l'épinglette, et supportait bien la pression latérale, pendant l'opération du bourrage. Elle était bouchée à sa partie supérieure par un morceau d'argile que l'on enlevait pour placer la mèche soufrée, ou par une bande de papier roulée en cornet et enduite de suif, à l'extrémité de laquelle on mettait le feu. Depuis quelques années on fait exclusivement usage, dans presque toutes les mines de ce comté, d'étoupilles ou cordes tressées

et goudronnées, contenant dans l'axe une traînée de poudre; elles sont fabriquées à Tuckingmill, près de Redruth, par Bickford, qui a pris une patente pour cet objet; leur usage est aujourd'hui répandu dans toute l'Angleterre. Les étoupilles patentées de Bickford, qu'il appelle *safety fusees*, coûtent deux pence par yard courant, à peu près 11 c. le mètre. Le mineur les coupe de longueur, en enfonce une extrémité dans la charge de poudre, qui est enfermée dans une enveloppe de papier fort ou de toile goudronnée, suivant que le trou est sec ou humide; l'étonpille étant enfoncée de plusieurs centimètres dans la poudre, est attachée à l'enveloppe qui la contient avec une petite ficelle qui ferme le sac, ou simplement en effilant sur une petite longueur l'enveloppe externe de l'étoupille, et se servant des fils ainsi détachés pour la lier à la cartouche. Le mineur applique ensuite l'étoupille contre la paroi du trou, où elle tient la place de l'épinglette, qui devient inutile; la poudre est mise à l'abri de l'humidité, par l'enveloppe extérieure et goudronnée de l'étoupille. Après le bourrage, le mineur met le feu à l'extrémité de l'étoupille restée en dehors du trou, celle-ci brûle avec lenteur, ce qui laisse à l'ouvrier le temps de se retirer et de se mettre à l'abri; la combustion de l'étoupille se propage avec une vitesse de 2 pieds anglais ($0^m,60$) par minute au plus: cette lenteur offre un grand avantage dans le travail ordinaire des mines où les trous sont peu profonds; elle est plutôt gênante lorsque les trous sont profonds, et les étoupilles longues, à cause de la perte de temps qu'elle occasionne.

M. John Taylor, dont tout le monde connaît la grande expérience déclara devant le comité de la chambre des communes, chargé, en 1835, de faire une enquête sur les accidents arrivés dans les mines, que l'usage des étoupilles de Bickford avait diminué de beaucoup le nombre des accidents dans le tirage à la poudre, et qu'elles devaient être considérées comme un perfectionnement d'une très-haute importance; à ce témoignage s'ajoutent les déclarations très-précises de plusieurs personnes qui ont fait un grand usage, en Angleterre, des étoupilles de Bickford. Je me bornerai à citer celle de B. Mullins, un des membres les plus éclairés de la société qui a l'entreprise des travaux du port de Kingstown: « Le tirage des rochers à la poudre, dit »M. Mullins, a été depuis plusieurs années, et est encore actuellement »une opération pratiquée sur une très-grande échelle, dans nos tra»vaux. Nous avons fait usage des étoupilles de Bickford, depuis l'été »de 1833. Cette méthode a notre approbation complète, comme étant »plus certaine dans ses effets, moins hasardeuse dans son application, »et définitivement plus économique que l'ancienne. Depuis l'introduc-

»tion du nouveau procédé jusqu'à ce jour, nous n'avons pas eu à dé»plorer un seul accident dans nos travaux, où nous avons consommé »73,000 livres (33,371 kilogrammes) de poudre et l'équivalent de »288,719 journées d'ouvriers. Je n'ai pas souvenir de plus de deux ou »trois coups qui aient manqué de prendre feu, et cela a eu lieu parce »qu'on avait employé pour le bourrage des matériaux mauvais, con»tenant des pierres qui ont coupé l'étoupille. Nous avons usé jusqu'à »ce jour 167,322 pieds courants (50,997 mètres courants) de ces étou»pilles, qui nous ont coûté 304 l. 7 s. 9 d. (7,673 fr. 60 c.), La quantité »de poudre qui aurait été nécessaire pour amorcer d'après l'ancien »procédé, eût été de 35 barils, d'une valeur de 105 l. (2,647 fr. 05 c.), »sans compter les frais de manutention nécessaires pour la préparer. »

Après avoir décrit l'ancien procédé qu'il compare au nouveau, M. Mullins continue ainsi :

« Quand on se sert des étoupilles de Bickford, la charge de poudre »peut être placée à une profondeur quelconque dans le rocher. Nous »avons récemment percé un trou de 5 pouces ($0^m,13$) de diamètre et »20 pieds 1/4 ($6^m,16$) de profondeur, dirigé horizontalement sur la »face antérieure d'un rocher, à Dalkey. Ce trou fut chargé de 85 livres »avoir-du-pois ($38^k,54$) de poudre, qui ont fissuré 2,000 tonnes de roc »solide, quantité bien supérieure à celle que nous eussions pu obtenir »avec une égale quantité de poudre employée dans des trous verticaux »ou inclinés. Dans un trou aussi profond et horizontal, il eût été pres»que impossible de mettre le feu par les anciens procédés, tandis que »l'étoupille met le feu d'une manière certaine, dispense de l'usage de »l'épinglette, et est un préservatif parfait contre une explosion pré»maturée, tout aussi bien que contre les *ratés* (miss-fire). Elle a en »outre l'avantage de permettre d'allumer à la fois un nombre quelcon»que de coups de mines, tandis qu'avec les procédés ordinaires, on »peut à peine en allumer plus de deux ou trois simultanément, sans »exposer les ouvriers à un danger très-grave.

« *Tirage dans les rochers humides, et sous l'eau, au moyen des »étoupilles de Bickford.* — Dans les carrières humides, l'effet des »étoupilles de Bickford est aussi assuré que dans celles qui sont sèches : »il suffit, lorsque le trou a rencontré une fissure qui fournit de l'eau, »même abondamment, de renfermer la poudre dans un sac imperméa»ble (1), et d'enfoncer dans la poudre une longueur suffisante de l'étou-

(1) Les mineurs de Cornwall emploient des sacs de toile qu'on plie sur un rouleau d'un diamètre presque égal à celui du trou. Ils les en-

»pille, contre laquelle on serre ensuite les bords du sac. Le trou étant »chargé ainsi, et bourré à la manière ordinaire, part aussi sûrement, »et la poudre y produit les mêmes effets que dans un roc sec.

» Le tirage sous de grandes profondeurs d'eau, au moyen de la cloche »à plongeur, est rendu beaucoup plus facile par l'usage de ces étou»pilles. Autrefois, on renfermait la poudre dans un étui d'étain auquel »était adapté un petit tube métallique, que l'on prolongeait par parties »successives assemblées à vis, à mesure que la cloche à plongeur était »remontée, jusqu'au-dessus de la surface de l'eau. On mettait ensuite »le feu à la poudre, en jetant dans le tube, par son orifice supérieur, »un fragment de fer incandescent.

» Les étoupilles pour le tirage sous l'eau, dites *sump fusees*, sont »confectionnées un peu autrement, et coûtent plus cher que les autres. »Voici la manière d'en faire usage : un sac imperméable contenant la »charge de poudre, au milieu de laquelle est enfoncé le bout d'une »étoupille de 5 à 6 pieds (2 mètres) de longueur, autour de laquelle les »bords du sac sont fortement serrés, est plongé dans un bain de poix »fondue, afin de rendre impossible l'accès de l'eau dans le sac par son »orifice (une excellente composition pour cet usage, consiste en un »mélange de huit parties pondérales de poix, une partie de cire d'a»beilles et une partie de suif fondues ensemble, sans ébullition). La »cartouche ainsi préparée est placée dans le trou foré dans le rocher, »que l'on bourre avec du sable, ou avec les débris mêmes de la pierre »résultant du forage du trou. L'extrémité de l'étoupille qui reste dans »l'intérieur de la cloche, est allumée, puis rejetée dans l'eau extérieure »en la faisant passer par dessous les bords de la cloche. Celle-ci est »alors écartée, sur un signal donné, à 8 ou 10 pieds de distance. L'é»toupille brûle dans l'eau et porte le feu à la poudre. Le petit éloigne»ment de la cloche du rocher que l'on fait sauter suffit pour écarter le »danger des ouvriers, et permet de reprendre le travail sans perte de »temps, aussitôt après l'explosion.

» Nous avons employé avec succès la méthode ci-dessus décrite, »pour la fondation du mur de quai du port du Commerce (*Commercial »wharf wall*), à 22 pieds de profondeur au-dessous des basses eaux »des grandes marées, et pour préparer la base qui devait recevoir les

---

duisent d'un mélange par parties égales de goudron, de poix et de résine, qu'ils ramollissent par l'addition d'une quantité de suif variable avec la saison ou la température de l'endroit où ils travaillent. Ces sacs sont provisoirement remplis de sable, dont on les vide pour y mettre la poudre.

«fondations de la pile orientale, à 28 pieds de profondeur au-dessous «des basses eaux, la marée montant de 12 pieds dans cet endroit. »

Suit une liste des accidents survenus dans les carrières exploitées pour les travaux du port de Kingstown, de laquelle il résulte que, dans les quinze années qui ont précédé l'époque où les entrepreneurs actuels ont pris les travaux, il y a eu trente ouvriers blessés par le tirage à la poudre, dont deux ont été blessés deux fois, ce qui porte à trente-deux le nombre total des accidents. Il y a eu dans le nombre, sept morts, quatre privés d'un œil, un privé des deux yeux et vingt blessés plus ou moins grièvement.

Dans les huit années du contrat actuel, il y a eu un seul blessé, et cela, avant que l'on fit usage des étoupilles de Bickford.

Le général Burgoyne a essayé lui-même les étoupilles préparées pour le tirage sous l'eau. Une étoupille semblable de 3/10 de pouce de diamètre, fut tenue plongée dans l'eau pendant seize heures, les deux bouts seulement étant tenus hors de l'eau ; après ce temps d'immersion, elle brûla très-bien dans toute sa longueur avec sa force ordinaire. Des étoupilles de 25 pieds de long, dont une extrémité était plongée dans quelques onces de poudre enfermées dans un sac imperméable, furent attachées à des cordes, le sac de poudre lesté par une pierre fut plongé dans l'eau, et l'autre extrémité de l'étoupille qui était à bord d'un batelet fut allumée ; le tout fut ensuite enfoncé dans l'eau, jusqu'à ce que la poudre arrivât à 39 pieds de la surface. Dans tous les essais, l'étoupille transmit le feu à la poudre dans un intervalle de treize à quatorze minutes.

Une autre étoupille préparée exprès et de 51 à 52 pieds de long, donna les mêmes résultats. Celle-ci était beaucoup plus grosse, le diamètre allant jusqu'à 5/8 de pouce.

Les étoupilles ordinaires non préparées pour le tirage sous l'eau furent également essayées. Dans quelques cas, elles brûlèrent bien jusqu'à plusieurs pieds sous l'eau, lorsqu'on y mit le feu peu de temps après l'immersion ; mais dans d'autres cas, elles ne brûlèrent que sur de très-petites longueurs. Ces étoupilles ne sont évidemment pas préparées convenablement pour une immersion totale et prolongée : mais elles suffisent dans les roches aquifères, pourvu qu'on y mette le feu sans les laisser longtemps en contact avec la roche humide.

Il est fâcheux que le prix des étoupilles soit aussi élevé ; à raison de 11 centimes le mètre courant, l'amorce d'un trou de $0^m,50$ de profondeur, que l'on ne charge assez souvent que de 70 à 100 grammes de poudre, reviendrait à 5 centimes, tandis que 100 grammes de poudre de mine coûteraient en France 21 c. à raison de 2 fr. 10 c. le

kilogramme. Ce serait donc une augmentation de près de 25 p. 0/0 sur le prix de la poudre. Cette proportion serait moindre dans le grand tirage, et même dans les puits et galeries de grandes dimensions, où l'on charge souvent des trous de 0m,60 à 1 mètre de profondeur, de 200, 250 et jusqu'à 500 grammes de poudre. L'avantage des amorces préparées dont il s'agit serait alors d'un avantage incontestable, et procurerait même certainement une économie, en diminuant le nombre des coups perdus, dans les endroits où il circule de l'eau.

Les étoupilles de Bickford ont été essayées dans plusieurs mines et carrières des départements de la Loire-Inférieure et de Maine-et-Loire, sur l'invitation et les indications de M. Lechatelier; il paraît résulter des observations consignées par cet ingénieur, dans un mémoire adressé à M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics, que l'emploi des étoupilles de Bickford permet de diminuer la dose de poudre, ce qu'il attribue aux moindres dimensions de la lumière ou canal ménagé à travers la bourre, pour porter le feu à la cartouche. L'usage de ces étoupilles pourrait donc être économique, malgré une augmentation de dépense apparente, même pour de petites charges de poudre. MM. Bickford ont établi récemment à Rouen une fabrique d'étoupilles. On s'en sert depuis quelque temps, avec un grand succès, pour faire sauter les piliers des carrières de plâtre de Montmartre.

Bourroirs en cuivre. — Lorsqu'on ne se sert pas des étoupilles de Bickford, l'usage des épinglettes en cuivre ne suffit pas pour écarter toutes les causes de danger : le bourroir lui-même peut, en frottant contre la roche, faire jaillir des étincelles qui mettent le feu à la poudre. On a donc proposé de terminer le bourroir à sa partie inférieure, qui est toujours renflée, par un bourrelet formé d'un alliage de cuivre et d'étain, que l'on soude à l'extrémité de la tige en fer. Les bourroirs de ce genre étaient usités autrefois dans les mines du comté de Cornwall; l'alliage était composé de 86 parties de cuivre et 14 d'étain.

Il ne faut jamais verser la poudre dans le trou. — Les étincelles produites par le frottement du bourroir contre la roche ne peuvent, au reste, déterminer l'inflammation de la poudre, que dans le cas où quelques grains de poudre seraient restés adhérents aux parois du trou, lors de l'introduction de la charge. Cette dispersion de la poudre est certainement la cause d'accident la plus fréquente et la plus dangereuse. Il importe donc de l'éviter, et c'est pour cela que nous avons dit qu'il ne fallait jamais verser la poudre dans le trou, comme la plupart des ouvriers mineurs ont malheureusement l'habitude de le faire; la charge de poudre doit être enveloppée dans du papier fort,

de manière à former une cartouche que l'on doit pousser jusqu'au fond du trou, non pas avec le bourroir en fer, mais avec une tige en bois. On met ensuite en place l'épinglette, que l'on enfonce jusqu'au quart ou à la moitié de la hauteur de la cartouche; immédiatement au-dessus de celle-ci, on place un petit tampon de bois tendre d'un diamètre un peu moindre que celui du trou sur le contour duquel on a ménagé une échancrure, pour le passage de l'épinglette, ou bien un tampon d'argile bien exempte de quartz, que l'on tasse doucement, et l'on bourre ensuite par dessus ce tampon, avec les matières convenables que l'on tasse par petites parties avec le bourroir. Si on ajoute à ces précautions l'emploi d'une épinglette en cuivre, ou terminée par une pointe en cuivre, dont la hauteur soit un peu plus grande que celle de la charge, ou, mieux encore, si l'on se sert des amorces de Bickford, l'usage du bourroir en fer ne paraît pas présenter de danger.

Les ouvriers mineurs sont bien loin de procéder avec ces précautions; le plus souvent ils versent la poudre dans le trou, placent immédiatement au-dessus un tampon de papier qu'ils poussent avec le bourroir en fer, et bourrent par dessus ce tampon, ou même sur la poudre, sans intermédiaire.

Le tampon de papier mis au-dessus de la poudre, a un inconvénient grave. Il peut arriver que la mèche ou amorce, quelle qu'elle soit, ne porte pas d'abord le feu jusqu'à la poudre, et allume seulement la partie supérieure du papier. Comme le feu se conserve et se propage lentement à travers la masse, le coup pourra tarder longtemps, et l'explosion n'avoir lieu qu'au moment où le mineur, persuadé que l'amorce n'a pas pris, reviendra pour en mettre une autre à la place. Le tampon de bois, usité dans les mines métalliques de la Saxe, ou les tampons d'argile préparée, sont bien préférables.

Tube de Chenalls pour porter la poudre au fond du trou. — Chenalls, capitaine de mines de Saint-Just, dans le comté de Cornwall, a proposé, depuis longtemps, un appareil pour porter la poudre au fond du trou, sans être obligé de l'envelopper dans du papier. Il consiste en un tube de cuivre, *fig.* 13, *Pl. IX*, de $0^m,60$ de longueur et d'un diamètre extérieur un peu moindre que celui du trou de mine, dans lequel se meut un petit piston tenant à une tige divisée : on retire le piston, de manière à ménager un vide capable de contenir la charge de poudre jugée nécessaire, que l'on verse dans le tube; on bouche ensuite celui-ci par un petit bouchon d'argile grasse, on le retourne et on l'introduit dans le trou, au fond duquel on laisse la poudre, en enfonçant la tige à plusieurs reprises. On retire le tube,

et on procède comme à l'ordinaire. L'appareil de Chenalls ne peut être employé que dans les trous inclinés vers le bas ou horizontaux; dans ce dernier cas, il est utile de placer sur le piston, avant de verser la poudre, un tampon d'argile grasse qui suffirait, peut-être, pour retenir la poudre dans les trous légèrement inclinés en montant.

Si l'on employait comme étoupille, un tuyau de plumes, ou les cordes patentées de Bickford, on pourrait appliquer à la paroi du tube de Chenalls, un petit tuyau cylindrique intérieur destiné à contenir cette amorce, que l'on placerait en même temps que la charge.

Il n'est pas douteux que l'appareil de Chenalls ne soit à recommander, partout où l'on ne voudra pas prendre la peine d'envelopper d'avance la poudre dans du papier. Mais cette préparation exige si peu de peine et de dépense qu'on la préférera généralement à l'emploi d'un appareil particulier.

Bourroir de M. Fournet. — Enfin, M. Fournet, directeur des mines d'Aniche (Nord) et autrefois de celles de la Grande-Croix (Loire), a proposé de placer l'épinglette, dans l'axe du trou, au milieu de la masse qui sert à bourrer, au lieu de l'appliquer contre la paroi, et de faire usage d'un bourroir formé d'une tige de fer terminée au bas par un disque en bronze, percé d'un trou central pour le passage de l'épinglette, qui est maintenue appliquée contre la tige par deux anneaux dans lesquels elle passe. M. Fournet emploie également des épinglettes terminées en bas par une pointe en bronze (voyez *Annales des Mines*, 3e série, t. XIII, p. 319).

Résumé des précautions à prendre contre les accidents. — Nous avons dû faire connaître tous les moyens qui ont été proposés, à notre connaissance, pour prévenir les accidents dans le tirage à la poudre. Nous reviendrons maintenant sur les mesures simples qui nous semblent devoir être prescrites par tout directeur d'exploitation qui aura à cœur la conservation de ses ouvriers. Quelques-unes de ces mesures nous paraissent de nature à être rendues obligatoires par des règlements d'administration publique :

1° Partout où la roche contiendra des parties susceptibles de donner des étincelles sous le choc de l'acier, proscrire l'usage des épinglettes en fer, et n'employer que des épinglettes de cuivre ou de bronze, soit en entier, soit au moins sur le tiers de la longueur totale à partir de la pointe. S'il était démontré que l'emploi des amorces de Bickford fût économique, ou n'occasionnât qu'une légère augmentation de dépense, leur usage devrait être prescrit par l'administration dans presque tous les cas.

2° Exiger que les ouvriers mineurs fassent des cartouches, en en-

veloppant la poudre dans du papier fort, et leur défendre expressément de verser la poudre dans les trous de mine.

3° Exiger que chaque ouvrier soit muni d'une tige en bois servant à pousser la cartouche jusqu'au fond du trou.

4° N'employer, pour le bourrage, que des matières exemptes de quartz, et faire préparer au besoin, pour cet objet, des boudins d'argile bien débarrassée de quartz.

5° Placer immédiatement sur la cartouche, soit le tampon de bois dont on fait usage en Saxe, depuis fort longtemps, soit un tampon d'argile grasse bien lavée, et dégagée de parties pierreuses.

6° Recommander aux ouvriers mineurs de ne revenir vers un trou de mine qui ne part pas, qu'après un temps égal à 8 ou 10 fois celui qui est nécessaire ordinairement, pour porter le feu jusqu'à la poudre.

Tirage dans les roches aquifères et sous l'eau. — Lorsque la roche est humide, le coup est souvent perdu, parce que la poudre se mouille, quoiqu'on ait le soin de sécher le trou, à l'avance, avec un tampon d'étoupes fixé au bout de la curette. Les sacs de toile goudronnée et les amorces de Bickford sont d'un usage sûr dans ces circonstances.

Le même procédé avec des étoupilles préparées exprès et dites *sump fusees*, et en prenant les précautions décrites précédemment, servira à faire sauter les rochers sous l'eau, à toute profondeur, soit que l'on fasse usage, pour percer et charger les trous, de la cloche à plongeur, soit que les trous soient simplement percés avec de longs fleurets dont l'extrémité supérieure s'élève au-dessus de la surface de l'eau.

Bourrage avec des coins pour le tirage sous l'eau. — Au lieu de bourrer sur la charge, à la manière ordinaire, Daniel Thumberg, dans les travaux exécutés à Carlscrown en Suède, a employé un moyen plus expéditif et d'un effet sûr, dont M. Baillet a publié la description dans le *Journal des Mines.* Il consiste à remplacer la bourre par deux coins en fer représentés *fig.* 15, *Pl. IX.* Chacun de ces coins est terminé par une face plane circulaire, d'un diamètre un peu plus petit que celui du tube en fer-blanc, dans lequel on place la charge de poudre pour le tirage sous l'eau. A la base du premier coin on attache la charge de poudre, contenue dans un sac de toile ou de papier, dont on serre les bords autour de la base du coin avec du gros fil. Le second coin s'applique sur le premier par sa face inclinée, et est surmonté d'une tige en fer qui s'élève au-dessus de l'orifice supérieur du tube en fer-blanc. Sur les faces des coins en contact est creusée, à la lime, une rainure qui va jusqu'à la poudre et qui se prolonge,

contre les parois du tube, par une règle en bois, creusée en gouttière, que l'on attache à la tige du coin supérieur, après y avoir logé l'étoupille destinée à communiquer le feu à la poudre. *e* est une mèche appliquée à l'extrémité de l'étoupille. BC sont deux radeaux qui servent aux ouvriers pour percer la pierre et la faire sauter.

D est une masse qui empêche la tige de fer supérieure d'être repoussée trop loin quand le coup part.

Quand on avait percé le rocher avec un fleuret suffisamment long et d'un calibre assez fort, on y introduisait un tuyau de fer-blanc, fermé par le bas, et contenant le chargement qui avait été placé d'avance. On plaçait la mèche *e*; on posait la masse D au-dessus de la tige et on mettait le feu : l'explosion avait lieu à l'instant; le coin *b* était chassé, mais le coin *c* ne pouvait céder et les deux coins réunis contenaient ainsi la charge dont l'effet ne manquait jamais, ainsi que l'expérience l'a démontré.

On perdait ordinairement quatre pieds de tuyaux et le coin inférieur, mais le coin supérieur pouvait servir à de nouvelles charges, parce qu'il n'était pas endommagé.

M. Baillet, à la suite de la traduction précédente de la notice de Daniel Thumberg, a proposé de substituer au tube en fer-blanc, une cartouche vernissée d'où partirait un tube flexible, qui se logerait entre les deux coins et s'élèverait au-dessus de l'eau, et de substituer au coin de fer supérieur, un coin de bois dur et très-sec. La cartouche vernissée et le tube flexible proposés par M. Baillet sont précisément les moyens aujourd'hui mis en pratique dans les travaux sous l'eau moyennant les étoupilles goudronnées de Bickford.

Divers modes de bourrages. — Des essais nombreux ont été faits à diverses époques, et dans beaucoup de localités, soit pour dispenser le mineur de l'opération du bourrage, soit pour augmenter l'effet de la poudre sur les roches, ou, ce qui est la même chose, pour obtenir une économie de poudre. Nous allons en rendre compte.

Bourre de sable. — M. Jessop a fait connaître, en Angleterre, le procédé suivi par quelques ouvriers mineurs qui se dispensaient de bourrer les trous inclinés de haut en bas, et se contentaient de les remplir de sable, après avoir placé sur la charge de poudre un ou deux tampons de bois, joignant assez mal les parois, et destinés seulement à séparer la poudre de la masse sableuse. On s'empressa d'essayer cette méthode, connue sous le nom de méthode de Jessop, dans plusieurs endroits de l'Angleterre et du continent. A la demande et sur les indications de M. Pictet, on en fit l'essai dans les travaux de la route du Simplon. On reconnut que le son, la sciure de bois et d'autres corps

Digitized by Google

pulvérulents produisaient le même effet que le sable; M. Baduel, ingénieur chargé de l'exécution des travaux, reconnut que les pétards dont la bourre ordinaire était ainsi remplacée par du sable étaient d'un effet moins sûr que les autres, et que, dans quelques cas, le sable était expulsé sans que la roche éclatât.

Des essais faits au Mont-Cenis par M. Decandolle, auraient au contraire indiqué que l'effet de la poudre sur le rocher était plus grand, quand le trou était rempli de sable, que quand il était bourré à la manière ordinaire.

Des expériences faites en Allemagne par MM. Héron de Villefosse, de Bonnard et le professeur Gilbert, en 1807, il paraîtrait résulter que l'élasticité, dans la matière employée pour recouvrir la poudre, est une circonstance plus essentielle, pour l'intensité de l'effet, que la pesanteur et la parfaite égalité du grain, et que le tirage au sable peut présenter un avantage réel pour les trous pratiqués de haut en bas, dans tous les endroits où il est plus facile de se procurer le sable quartzeux que l'argile usitée pour bourrer. (*Richesse minérale*, t. II, p. 104.)

Les essais faits aux mines de Pesey et dont il est rendu compte par M. Lelivec, dans le *Journal des Mines*, t. XIX, p. 235, sont décidément contraires à l'efficacité de la méthode de Jessop. Sur huit ou dix trous de 0m,03 de diamètre et 0m,30 à 0m,40 de profondeur, on en chargea quelques-uns d'après l'ancienne méthode et les autres d'après la nouvelle, en laissant l'ouvrier libre de mettre la poudre qu'il jugea convenable. Toutes les mines bourrées firent sauter le rocher; les autres ne le fendillèrent même pas. On n'eut pas un meilleur résultat, en doublant et même triplant, dans quelques-uns de ces derniers, la dose de poudre. La dose ordinaire suffit au contraire pour faire éclater la roche, quand on bourra les trous à la manière ordinaire, au lieu de les remplir de sable.

Les expériences faites dans d'autres mines ont si bien confirmé celles de Pesey que le bourrage avec du sable, ou autres matières pulvérulentes, a été abandonné partout, malgré l'économie de main-d'œuvre qu'il procure. Le général Burgoyne conclut des nombreuses expériences qu'il rapporte dans la brochure déjà citée, que le sable, quels que soient la finesse du grain et son poids spécifique, qu'il soit tassé ou simplement versé dans le trou, est parfaitement sans effet dans des trous peu profonds, et avec de petites doses de poudre; il est alors rejeté hors du trou, et le rocher n'éclate pas. Un quart d'once de poudre suffit pour expulser complétement la bourre en sable d'un trou d'un pouce de diamètre, et deux pieds de profondeur, tandis que trois onces de poudre ne peuvent chasser une bourre en argile fortement tassée

dans un trou des mêmes dimensions. Le sable employé comme bourre, dans des trous ayant au moins neuf pieds de profondeur sur deux pouces et demi de diamètre, est manifestement inférieur au bourrage ordinaire avec de l'argile. C'est une confirmation complète des expériences de Pesey.

D'après d'autres expériences du général Burgoyne, l'argile exempte de pierres, façonnée en boudins et desséchée fournirait une bourre plus résistante que la brique ou des fragments de pierre pilés dans le trou.

On conçoit bien qu'une colonne de sable ou autres matières pulvérulentes, même assez courte, mise au-dessus de la poudre, suffise, malgré le faible effort qu'exige son déplacement, pour faire éclater la roche, parce que son expulsion ne peut avoir lieu sans que la pression des gaz de la poudre, et le mouvement que cette pression tend à imprimer, se transmettent d'une extrémité à l'autre de la colonne, et que la durée nécessaire pour cette transmission peut être assez grande comparativement à la durée très-courte de l'inflammation de la poudre; mais on conçoit aussi que la durée de cette transmission soit plus grande pour une colonne d'argile tassée fortement avec le bourroir, et dont la roideur est très-petite, que pour une colonne de même longueur de matières pulvérulentes, qui ont en outre l'inconvénient de laisser fuir les gaz à travers les interstices qui les séparent, bien plus facilement que la colonne d'argile adhérente aux parois du trou. Il est donc tout simple que la bourre ordinaire en argile tassée soit plus efficace que la bourre en sable, dont l'emploi a séduit d'abord par le contraste piquant entre la grandeur de la résistance de la roche à la rupture, et la faiblesse apparente de l'obstacle qu'on opposait à l'énorme pression développée par les gaz de la poudre.

Espace vide ménagé près de la poudre. — On sait qu'un canon de fusil crève le plus ordinairement lorsqu'on laisse un espace rempli d'air entre la poudre et les projectiles ; on dit même qu'il suffit, pour déterminer la rupture du canon, de boucher légèrement son extrémité par un petit tampon d'argile, de neige etc. ; ou de l'engager de quelques centimètres dans l'eau, au moment de l'inflammation de la poudre. On en a conclu, par analogie, qu'on augmenterait l'action de la poudre sur les parois du trou, c'est-à-dire, sur la roche, en laissant un espace rempli d'air, soit entre la poudre et le fond du trou, soit entre la poudre et la bourre.

M. Héron de Villefosse, rapporte, dans la *Richesse minérale*, t. II, p. 104 et 105, que la méthode de tirage qu'il appelle *Méthode au tasseau par dessous* a été trouvée constamment plus avantageuse que toutes les autres, dans des expériences multipliées faites en 1807, tant

dans les mines du Hartz que dans le pays de Mansfeld. On s'est assuré, » dit-il, « après avoir tiré ainsi pendant plusieurs semaines dans tout » un distrtct des mines du Hartz, et tenant note exacte des résultats, » que cette méthode était capable d'épargner un quart de la poudre qui » est dépensée pour obtenir le même effet *par le tirage à la bourre* » *d'argile*. Elte est pratiquée avec te même succès en Norwège, d'où » M. Hausman nous l'avait rapportée. »

Cette méthode *au tassau par dessous* consiste à ménager un espace rempli d'air au fond du trou, au-dessous de la cartouche. A cet effet on emploie un tasseau de bois ayant la forme d'un cône tronqué sur la grande base duquel serait un cylindre de la hauteur d'une dame à jouer, d'un diamètre égal à celui du trou, et sur te contour duquel sont ménagées quatre petites entailles ou échancrures longitudinales, parallèles à l'axe du tasseau qui a en tout six à huit centimètres de longueur ; on enfonce ce tasseau dans le trou, de manière que la petite base du tronc de cône s'appuie sur le fond ; on dépose la cartouche sur le tasseau, et on bourre immédiatement par dessus avec de l'argile, comme à l'ordinaire. Le tasseau est quelquefois rejeté, à la suite de l'explosion; d'autres fois il est déplacé avec la masse attaquée, à laquelle il reste fixé.

M. Héron de Villefosse ne dit pas, si dans les essais faits au Hartz et dans le pays de Mansfeld, on a laissé aux trous de mine chargés avec tasseau en dessous, leur profondeur ordinaire, ou si on leur a donné une profondeur plus grande, en raison de l'espace occupé par le tassean, au fond du trou. Dans ce dernier cas, qui paraîtra assez probable, si l'on réfléchit que, dans les mines métalliques du Hartz, la plupart des trous de mines n'ont pas au delà de 0m,43 à 0m,55 de profondenr (*Richesse minérale*, t. II, p. 101), et que te tasseau de six à huit centimètres occuperait ainsi un septième environ de la profondeur du trou, on pourrait se demander si l'économie de poudre obtenue n'a pas été compensée par une augmentation de dépense en main-d'œuvre. St en effet on a donné plus de profondeur aux trous, de manière que la charge de poudre occupât toujours à peu près la même région dans l'intérieur de la roche, avec ou sans tasseau, on s'explique bien comment l'addition d'une cavité inférieure en partie remptie d'air, a augmenté l'effet de la poudre. Les gaz produits par ta combustion de la poudre se répandent en effet dans la cavité existante à la partie inférieure du trou ; l'expulsion de la bonrre, à la longueur égale, doit être moins prompte, et l'inflammation de la poudre plus complète ; car on sait que dans le tirage ordinaire, beaucoup de grains de poudre sont rejetés hors du trou, lors de l'explosion, intacts et sans être brûlés. On conçoit donc

d'une part que la pression développée par les gaz puisse devenir finalement plus considérable, malgré l'existence de l'espace rempli d'air; il est évident, d'ailleurs, que cette pression agit sur les parois de la roche, pendant un plus long intervalle de temps, et qu'elle s'étend sur une surface de roche plus considérable. L'augmentation d'effet de la poudre, recouverte d'une même longueur d'argile bourrée, lorsqu'on laisse un espace plein d'air, en dessous de la charge, est donc assez facile à concevoir. C'est ainsi que dans les mines militaires, les effets de la poudre sont moins concentrés, mais plus destructifs au loin, lorsque l'on donne à la chambre occupée par la charge, une capacité égale à quatre fois le volume de la poudre. (*Mémorial de l'Officier du génie*, t. 1, p. 27.)

Mais si on laisse aux trous de mines la même profondeur, et si l'on place la poudre au-dessus du fond du trou, en la recouvrant d'une bourre dont la longueur soit diminuée de toute la hauteur du tasseau, l'effet du vide inférieur ne sera-t-il pas souvent compensé, et peut-être plus que compensé par la diminution de longueur de la bourre? Cette question, ainsi que l'économie définitive qu'il peut y avoir à faire usage du mode de tirage décrit par M. de Villefosse, ne peuvent être résolues que par l'expérience, et il semble qu'elle ne s'est pas prononcée bien clairement à cet égard; car le mode de tirage dont il s'agit ne s'est pas étendu à d'autres localités, et n'a pas même été conservé au Hartz.

On a aussi essayé, dans diverses localités, de laisser un espace rempli d'air, entre la poudre et la bourre; on se servait à cet effet d'un tasseau de bois ayant la forme d'une bobine, ou plutôt d'un petit cylindre portant à chaque extrémité deux dames à jouer, d'un diamètre égal à celui du trou. Ce tasseau était enfoncé sur la poudre, et la bourre d'argile tassée par dessus. Plusieurs expérimentateurs ont prétendu qu'il en résultait, à dose égale de poudre, une augmentation d'effet, ou à effets égaux, une économie de poudre. Cependant il ne paraît pas que ce procédé, essayé encore récemment dans les mines de Freyberg (1), ait offert de l'avantage. On ne conçoit pas en effet comment l'expulsion de la bourre d'argile devenue plus courte de toute la longueur du tasseau, aurait pu être retardée par l'interposition de ce tasseau.

(1) *Annuaire du Mineur de Freyberg* (*Bergkalendar*), année 1840.

Digitized by Google

Il nous semble que l'on s'est trompé dans les inductions tirées de ce que la rupture des canons de fusil peut être déterminée par un espace vide d'air laissé entre la poudre et les projectiles.

Dans un fusil, les projectiles occupent une très-petite longueur au-dessus de la charge de poudre, comparativement à l'espace occupé par la bourre, dans un trou de mine. La pression de la poudre se transmet donc d'une extrémité à l'autre de la charge d'un fusil, incomparablement plus vite que d'une extrémité à l'autre de la bourre. Une colonne d'air interposée entre la poudre et les projectiles contenus dans un fusil, retarde nécessairement l'expulsion des projectiles, et l'échappement des gaz de la poudre, d'une manière très-notable, tandis qu'il n'est pas probable que cette colonne d'air, laissée au-dessus de la poudre, dans un trou de mine, retarde l'expulsion de la bourre argileuse, raccourcie d'une quantité égale à la longueur de la colonne d'air, surtout quand on met un corps solide tel qu'un tasseau de bois, entre la poudre et la bourre.

Mélanges de poudre et de diverses substances pulvérulentes. — Enfin, il me reste à indiquer les essais faits à diverses reprises pour employer, au lieu de poudre pure, un mélange de poudre et de diverses substances pnlvérulentes. On annonça, il y a environ vingt ans, que pour faire sauter les rochers, on employait avec succès au Brésil, au lieu de poudre pure, un mélange de poudre et de poussière fournie par les étamines d'une certaine plante. Plus tard, on dit que dans l'Amérique du Nord, on avait employé un mélange de poudre et de chaux vive. Des essais furent faits immédiatement en Allemagne, et principalement en Silésie.

M. Thürnagel, officier des mines prussien, fit essayer dans la mine dite Friedrichsgrube, près Tarnowitz, un mélange à parties égales en volume de poudre et de sciure de bois. Il résulta des essais une économie de poudre très-notable, et l'on continua à faire usage du mélange de poudre et de sciure de bois pendant deux ans et demi. (Les résultats avantageux de ces essais furent publiés dans *Archiv für Bergbau*, *etc.*, vol. I et II.) Des essais analogues furent faits dans diverses mines d'Allemagne, en mélangeant la poudre soit avec de la sciure de bois, soit avec d'autres substances pulvérulentes, telles que du colophonium, de la poudre de lycopode, etc. On obtint des résultats divers, suivant les localités. Dans quelques endroits, le résultat des essais fut décidément contraire au nouveau procédé ; dans d'autres l'économie de poudre fut nulle ; dans d'autres enfin, elle fut très-sensible, comme à Tarnowitz. Vers l'année 1823 ou 1824, M. Thürnagel, celui-là même qui avait fait connaître les résultats avantageux

obtenus dans les premiers essais faits à Tarnowitz, entreprit de nouvelles expériences comparatives avec de la poudre pure, et avec des mélanges, à parties égales en volume, de poudre et d'autres substances, savoir de la sciure de bois, qu'on employait à Tarnowitz depuis deux ans et demi, de la limaille de cuivre jaune, de la sciure de corne, de la balle d'orge, d'avoine, de blé noir, de scigle, de la garance, de la tannée, enfin de la chaux vive.

Des expériences nombreuses qui ont été publiées dans le VIII[e] vol. de l'*Archiv*, 1[re] partie, page 140, il paraît évidemment résulter :

1° Qu'il n'y a pas d'avantage marqué à employer un mélange de poudre et de sciure de bois, ou de toute autre matière, au lieu de poudre pure, et que les effets produits par les mélanges de poudre avec les diverses substances indiquées ci-dessus, sont à fort peu près proportionnels à la quantité de poudre qu'ils contiennent, de sorte que cette quantité, placée seule dans le trou, produit sensiblement le même effet que le mélange.

2° Que l'économie obtenue dans la mine *Friedrichsgrube*, lors des premiers essais, économie qui s'était soutenue depuis deux ans et demi, devait être attribuée, pour la plus grande partie au moins, et peut-être pour la totalité, à ce que précédemment les ouvriers mineurs consommaient plus de poudre qu'il n'en fallait pour obtenir les effets désirés.

3° Que le mélange de poudre et de chaux, à parties égales en volume, produit un effet moindre que la dose de poudre contenue dans ce mélange employée seule ; que les mélanges de poudre et de chaux, dans lesquels la chaux entrerait en moindre proportion, pour un tiers, un huitième ou un douzième, sont moins efficaces que les mélanges dans lesquels la chaux serait remplacée par de la sciure de bois.

Enfin, l'emploi de la chaux mêlée à la poudre, quand même il serait utile sous d'autres rapports, ce qui n'est pas, aurait, dans les mines, l'inconvénient très-grave d'augmenter l'incommodité provenant de la fumée et des vapeurs qui succèdent à l'explosion. La sciure de corne, la poudre de colophonium, etc., sont dans le même cas.

D'après les faits que j'ai rapportés en dernier lieu, il ne paraît pas douteux que les avantages qu'on avait cru trouver dans la substitution à la poudre ordinaire, pour les coups de mines, de mélanges de poudre avec diverses matières pulvérulentes, n'ont rien de réel. Les essais de ce genre ont eu néanmoins de l'utilité dans les localités où l'on consommait plus de poudre qu'il n'était nécessaire.

Quant à la bourre de sable substituée à la bourre d'argile tassée, on ne saurait en recommander l'usage, si ce n'est dans le cas où on au-

rait trop de peine à se procurer des matières argileuses ou autres, exemptes de quartz, pour l'opération du bourrage : car il est bien certain que l'économie de poudre résultant de l'emploi du bourrage au sable substitué à la bourre d'argile est une pure chimère.

Un espace vide d'air laissé entre la cartouche et la bourre parait être plutôt nuisible qu'utile, d'après les expériences récentes faites à Freyberg, et dont les résultats sont indiqués dans l'Annuaire de l'Académie de Freyberg pour 1840.

De tous les procédés de tirages essayés, il ne reste donc que celui du tirage *au tasseau par dessous*, avec vide inférieur à la cartouche, décrit par MM. Haussmann et Héron de Villefosse, qui pourrait avoir un avantage réel et décidé sur le procédé ordinaire; il existe pourtant, contre cette méthode, une présomption défavorable, c'est que malgré les avantages apparents obtenus en Norwège et au Hartz, d'après les auteurs que j'ai cités, son usage ne s'est pas propagé, ni même conservé au Hartz.

Moyens qui paraissent propres à réaliser une économie de poudre. — Cependant, si l'on fait attention que le tirage à la poudre est presque toujours accompagné de projections des débris de la roche fracturée, à des distances considérables, tandis que le but de l'opération est seulement de vaincre la cohésion de la roche, sans en projeter les fragments, on en conclura que toute l'action de la poudre, ou plus exactement tout le travail moteur développé par l'expansion des gaz qui résultent de sa combustion, n'est pas utilement employé à produire l'effet que l'on a en vue, et qu'il y a lieu de croire qu'une modification convenable des procédés ordinaires pourrait conduire à une économie assez considérable de poudre. Mais les essais qu'on pourra faire à ce sujet ne conduiront à un résultat utile, qu'autant qu'ils seront dirigés conformément aux vrais principes de la mécanique, et non à des idées préconçues et à des analogies tout à fait incomplètes entre les effets observés dans les armes à feu, et ceux de la poudre dans les trous de mines.

Une roche que l'on attaque à la poudre a toujours une forte ténacité; elle est en outre fort peu compressible et très-roide; en d'autres termes un très-petit écartement entre les parties d'une roche suffit pour produire la rupture, la séparation définitive de ces parties; mais il faut une très-grande pression pour déterminer cet écartement. Or les gaz de la poudre, au moment de l'inflammation, où ils se trouvent resserrés dans le petit espace qu'occcupait la poudre solide, exercent une pression énorme que Rumford a évaluée jusqu'à 50,000 atmosphères, mais qui, plus probablement, ne dépasse pas 2000 atmos-

phères, ou 20,000,000 kilog. par mètre carré superficiel, suivant l'évaluation de Hutton. Cette pression initiale est d'ailleurs la même, quel que soit le volume de poudre enflammée, sauf les pertes dues au refroidissement par contact avec les parois de l'espace que remplit la poudre, pertes qui croissent naturellement avec l'étendue relative des parois, et sont par conséquent plus considérables pour un petit que pour un grand volume de poudre. Mais encore la perte de chaleur n'est pas instantanée, et par conséquent la pression doit demeurer à peu près la même, dans le premier instant, toutes les fois que l'action des parois ne contribue pas à prolonger la durée de l'inflammation de la poudre. Cela posé, il paraît évident que la forme cylindrique donnée aux trous de mines n'est pas, à beaucoup près, favorable à l'économie de la poudre ; car la pression exercée par les gaz de la poudre, dans une direction quelconque, est égale à la pression sur l'unité superficielle, multipliée par l'aire de la section rectangulaire du cylindre de poudre par un plan conduit suivant son axe. Ces pressions égales dans toutes les directions, autour de l'axe du cylindre, ne contribuent pas toutes efficacement à l'effet que l'on veut produire. Car la roche que le mineur fait sauter a toujours été au préalable dégagée sur un ou plusieurs de ses côtés ; de sorte qu'on peut prévoir d'avance, avec certitude, le sens dans lequel se fera la déchirure principale, et la direction moyenne que prendront les éclats, projetés après la rupture. Or, il est évident que si l'on peut obtenir la même pression initiale dans le sens perpendiculaire à la déchirure qui tend à se produire avec une moindre quantité de poudre, en diminuant seulement les pressions qui ont lieu dans les autres directions, on pourra produire les mêmes ruptures dans la roche, en réalisant une économie de poudre.

Supposons, par exemple, que l'on veuille faire sauter à la poudre un gradin de rocher ABC, *fig.* 26, *Pl. IX*, dégagé sur ses faces supérieure et antérieure. On pourra placer un trou de mine en A, au pied de l'escarpement D; si le gradin n'a pas trop de largeur, et si d'ailleurs la roche est passablement homogène, il est évident que la masse de rochers détachée par le pétard aura une forme analogue à *sAt* et sera projetée dans le sens X. La ligne de déchirure passera à peu près par l'axe du trou. Au moment même de l'inflammation de la poudre, la déchirure commencera des deux côtés du trou, et se propagera de part et d'autre vers *s* et vers *t*. La roche étant extrêmement roide, la rupture se propagera à une assez grande distance, pour un écartement extrêmement petit des parties disjointes dans le voisinage du trou A par conséquent la rupture sera complète, avant que l'espace dans

lequel pourront se répandre les gaz de la poudre ait considérablement augmenté. Il résulte de là que si les choses sont disposées de manière que la pression initiale des gaz de la poudre dans le sens de la flèche X, et dans le sens directement contraire, reste la même, les effets seront à peu près aussi les mêmes, quelle que soit d'ailleurs la quantité totale de poudre placée dans le trou. Or si au lieu de charger le trou à la manière ordinaire, on introduisait au fond de ce trou, un tampon de bois demi-cylindrique qui le remplirait à moitié, et dont la face plane serait disposée suivant la ligne *mn* perpendiculaire à la direction X, la pression initiale des gaz de la poudre resterait la même, quoique la quantité de poudre fût réellement diminuée de moitié, sauf toutefois l'influence qu'exercerait l'augmentation de l'étendue des parois touchées par la poudre sur la rapidité avec laquelle elle s'enflammerait. Il y a lieu de croire que par cette disposition, la masse de rocher détachée resterait à peu près la même, pour un poids de poudre moitié moindre; seulement les fragments de rocher détachés seraient moins brisés, et projetés à des distances plus petites, ce qui est indifférent pour le but qu'on se propose.

Les mêmes considérations conduisent à cette conclusion, que la meilleure forme à donner à l'espace occupé par la poudre, ne serait pas la forme demi-cylindrique, mais bien la forme prismatique à base rectangulaire, le plus grand côté de la base étant disposé perpendiculairement à la ligne de moindre résistance. Quant aux rapports des deux côtés de cette base, il devrait sans doute varier avec la quantité totale de poudre employée, pour que l'influence des parois ne diminuât pas trop l'*activité* de la poudre, en prolongeant la durée de l'inflammation. Les trous de mines ne peuvent guère être creusés que cylindriquement; mais on peut en remplir une partie avec des tasseaux de bois, ou bien préparer des cartouches dont une partie serait occupée par un ou deux tasseaux de bois convenablement disposés. Reste à savoir si l'économie très-probable de poudre qui résulterait de ces procédés, ne serait pas compensée par la dépense en main-d'œuvre nécessaire à la préparation de tasseaux de forme appropriée, et des cartouches.

Il me suffit ici d'avoir indiqué le genre de modification que l'on peut raisonnablement essayer d'apporter aux procédés généralement usités dans le but d'obtenir une économie de poudre, et d'avoir rappelé les vrais principes de cette question, qui a occupé beaucoup de mineurs. J'ajouterai que plusieurs éléments de cette dernière discussion m'ont été suggérés par un entretien avec MM. Poncelet et Piobert, que je me

fais un devoir de rappeler ici, en les priant d'en agréer mes remerciements (1).

Composition et qualité extérieures de la poudre. — La poudre de mines diffère par sa composition de la poudre de chasse et de la poudre à canon. Les dosages adoptés pour la fabrication en France, sont les suivants :

	Salpêtre.	Charbon.	Soufre.
Poudre de guerre. . . .	750	125	125
Poudre de chasse. . . .	780	120	100
Poudre de mines. . . .	650	150	200

Dans les mines militaires, on calcule le côté intérieur du coffre cubique dans lequel on renferme la poudre, en admettant que le décimètre cube de poudre (un litre) pèse 941 grammes.

Les qualités extérieures d'une bonne poudre sont d'avoir le grain égal, dur et bien dépouillé de poussière. L'égalité du grain se juge à la vue, la dureté en cherchant à l'écraser dans le creux de la main, l'absence de poussière en roulant sur le dos de la main un grain de poudre qui ne doit pas laisser de trace.

La poudre doit être conservée en lieu sec, dans des barils ou des sacs de cuir. Elle perd beaucoup de sa force par l'humidité. La poudre humide recouvre sa qualité par la dessiccation au soleil; mais la poudre qui a été humectée ne peut plus redevenir bonne.

---

(1) M. l'officier du génie Leblanc (J.-J.), dans un mémoire très-intéressant sur la *Théorie des pétards*, publié dans le septième numéro du *Mémorial de l'officier du génie*, p. 216, après avoir montré que l'effet de la poudre, dans les pétards, dépend surtout de la pression initiale, propose de placer dans l'axe de la cartouche un noyau cylindrique en bois, par lequel on remplacerait un certain volume de poudre, qui serait économisé. La poudre formant la charge remplirait l'espace annulaire compris entre le noyau et les parois cylindriques du trou. Il nous paraît évident qu'il serait préférable de placer dans la cartouche un noyau de bois demi-cylindrique remplissant la moitié du trou, et placé de manière que la face plane du demi-cylindre fût perpendiculaire à la ligne de moindre résistance, ainsi que nous l'avons indiqué dans le texte. La masse de poudre s'enflammera ainsi beaucoup plus complètement, parce qu'elle sera en contact avec des surfaces extérieures d'une étendue beaucoup moindre, et, de plus, la préparation des cartouches nous paraît devoir être plus facile et plus économique. Il faudra seulement avoir soin de tourner la cartouche dans le sens convenable en la plaçant dans le trou.

Digitized by Google

Épreuve de la poudre à canon dans l'artillerie. La poudre à canon est éprouvée dans l'artillerie de la manière suivante : On se sert d'un mortier d'épreuve qui a 0m,19118 de diamètre à l'âme et un peu plus d'un diamètre de longueur. La chambre, qui est cylindrique, contient 92 grammes de poudre. Il est coulé sur semelle, à l'angle constant de 45 degrés.

Le boulet ou globe d'épreuve en cuivre se met sur le tour au calibre juste de 0m,18949 et pèse 29 kil., 3704 (60 livres anciennes). On obtient ce poids exact, en forant un trou dans l'intérieur du globe. La poudre est introduite dans la chambre avec un entonnoir, et l'on ne met aucune espèce de bourre entre elle et le globe qui, reposant sur les bords de l'orifice de la chambre, n'occasionne ni tassement, ni écrasement dans la charge. On amorce avec une mèche à étoupille.

La poudre neuve est reçue, lorsque le globe d'épreuve est porté à 225 mètres de distance horizontale.

La résistance de l'air au mouvement du globe est très-faible à cause de la petite quantité de poudre comparée au poids du globe. On peut donc admettre que sa trajectoire ne diffère pas sensiblement de la parabole qu'il décrirait, s'il cheminait dans un espace vide, et calculer en conséquence la vitesse initiale correspondante à la portée de 225 mètres. Or en désignant par α l'inclinaison de la vitesse initiale sur l'horizon, l'amplitude du jet est donnée par l'équation $d=\frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}$, dans laquelle d est l'amplitude ; v la vitesse initiale, et g la gravité $=9^m,8088$ (Voyez le *Traité de mécanique* de M. Poisson) ; pour le mortier d'épreuve $\alpha=45°$ $\sin 2\alpha=1$. $d=225$ mètres : en substituant ces valeurs numériques, l'équation précédente donne pour la grandeur la vitesse initiale du globe d'épreuve $v=46^m,97$. La demi-force vive de correspondante à cette vitesse initiale est égale à :

$$\frac{29,3704}{2g}\times\overline{46,97}^2=\frac{29,3704}{2}\times 225=3304.$$

Cette demi-force vive est, d'après les principes connus de la mécanique, la mesure du travail moteur transmis au globe d'épreuve, par l'action de la poudre, ce travail étant exprimé en kilogrammes élevés à un mètre de hauteur. La charge du mortier d'épreuve étant de 92 grammes de poudre, on trouve que le travail moteur d'un kilogramme de poudre serait, dans les mêmes circonstances, de 35,913 kilogrammes élevés à 1 mètre.

Quantités de travail utilisées dans les bouches à feu. — Dans les bouches à feu de gros calibre chargées avec un poids de poudre égal

au tiers de celui du boulet, le travail moteur de la poudre, calculé d'après les vitesses initiales imprimées aux projectiles, est à peu près égal à celui qui est réalisé dans le mortier d'épreuve. Ainsi, d'après M. Poncelet (*Mécanique industrielle*, p. 180), un boulet de 12 kilogrammes chassé par 4 kilogrammes de poudre, prend une vitesse initiale de 500 mètres par seconde : en tenant compte de la force vive imprimée à la pièce qui recule, le même auteur trouve 153,415 kilogrammes élevés à 1 mètre pour le travail moteur développé par les 4 kilogrammes de poudre, ou 38,354 kilogrammes à un mètre par kilogramme de poudre.

Le travail moteur transmis au projectile diminue avec le calibre des pièces, et éprouve une réduction d'un tiers environ dans les fusils de munition ordinaires, où les balles de dix-neuf à la livre, chassées par moitié de leur poids de poudre, prennent aussi, d'après M. Poncelet (*Mécanique industrielle*, p. 183), une vitesse initiale qui est moyennement de 500 mètres par seconde.

Dans le mortier d'épreuve comme dans les pièces de vingt-quatre, le volume occupé par les gaz de la poudre, au moment où le projectile sort de la pièce est de sept à neuf fois aussi grand que le volume de la charge de poudre. Ces gaz se détendent donc, pendant leur action sur le projectile et la pièce, jusqu'à occuper un espace égal à sept ou neuf fois leur volume primitif. Le travail moteur dû à leur expansion ultérieure, après la sortie du projectile, est perdu pour l'effet que l'on a en vue.

Le travail moteur des gaz de la poudre utilisé dans les trous de mines, est encore moindre que dans les bouches à feu.—Dans le tirage des rochers à la poudre, le travail moteur de la poudre réellement utilisé pour l'opération, est celui qui correspond à la détente depuis le volume primitif de la poudre, jusqu'au moment où les particules de la roche ont été suffisamment écartées pour qu'il y eût rupture. Or, à cause de la grande raideur, du peu de compressibilité et d'extensibilité des rochers, il est évident que les fissures se font presque instantanément dans toute leur étendue, et ont lieu avant que les dimensions de l'espace occupé par la poudre aient beaucoup augmenté. Ainsi, le travail moteur que la poudre est susceptible de développer, paraît être encore mieux utilisé dans le tir des bouches à feu, que dans le tirage des rochers, où les effets de projection sont tout-à-fait inutiles.

Cependant le travail moteur retiré de l'action de la poudre, même dans les bouches à feu, revient à un prix excessivement élevé, quand on le compare à celui du travail moteur développé par la combustion de la houille dans les machines à vapeur les plus médiocres. Les foyers de ces machines brûlent en effet à peu près 5 kilogrammes de houille

par force de cheval et par heure. Or comme l'espèce d'unité désignée dans la mécanique appliquée par le mot *force de cheval*, exprime un travail de 75 kilogrammes élevés à un mètre de hauteur dans une seconde de temps, il s'ensuit que le travail moteur de 5 kilogrammes de houille est de 75 $\times$ 5,600 = kilogr. él. à un mètre, et celui de 1 kilogramme de poudre de 54,000 kilogr. él. à un mètre, environ moitié en sus de celui qui est transmis aux projectiles, par un kilogramme de poudre à canon, dans le mortier d'épreuve et les bouches à feu de gros calibre. Or, le kilogramme de houille ne vaut pas généralement en France plus de 0 fr. 30 c. Sur les houillères, il ne vaut que la moitié de ce prix, tandis que le kilogramme de poudre de mine coûte 2 fr. 10 cent., sept fois autant.

Il serait, dans certains cas, plus économique de broyer le rocher avec des outils aciérés, que d'employer la poudre. — La poudre est donc un agent très-énergique susceptible de produire des pressions énormes, mais dont le *travail moteur utilisé* revient à un prix très-élevé. Si son emploi dans les mines a produit une économie considérable, cela tient à ce qu'il a été substitué à la main de l'homme qui ne pouvait faire usage que d'outils extrêmement simples, les coins et les marteaux, pour attaquer des roches d'une ténacité énorme, et qui, en outre, travaillait habituellement dans des endroits resserrés, où il était obligé de prendre une position gênante qui ne lui permettait pas de tirer de sa force le meilleur parti possible.

Aujourd'hui que l'on sait utiliser les agents naturels beaucoup mieux qu'à l'époque de la découverte de la poudre, il semble probable qu'il y aurait économie à faire usage de machines à vapeur, pour certains travaux qui sont exécutés à la poudre, par exemple, pour le creusement des puits verticaux, dans des roches dures. Ici la roche pourrait être broyée par percussion, sous le choc d'un large mouton armé d'outils aciérés de forme appropriée, et suspendus par une chaîne à un engin établi sur le puits. La percussion pourrait être produite par une machine à vapeur, au moyen d'un mécanisme très-simple, et il serait également facile d'imprimer au mouton, pendant qu'il serait soulevé, un mouvement de rotation, par la machine ou à bras d'homme.

L'extraction des eaux serait inutile, pendant le creusement, et nécessaire seulement, dans le cas où il faudrait soutenir les parois de l'excavation par un boisage ou muraillement, ou quand on aurait besoin de descendre au fond du puits, pour extraire des fragments d'outils brisés accidentellement, qu'on ne pourrait retirer autrement. On pourrait même, afin d'éviter des dépenses d'épuisement, faire usage

d'une cloche à plongeur. Les débris de roches broyées seraient vidés avec des cylindres à soupapes. En un mot, ce seraient des sondages d'un très-grand diamètre, exécutés dans des roches non éboulеuses, au moyen de machines à vapeur, et avec une faible dépense de main-d'œuvre.

Aux dépenses de poudre seraient substituées les dépenses de combustible pour le foyer de l'appareil moteur, et les frais, du reste assez considérables, d'entretien des outils aciérés qui attaqueraient directement la roche. Il me semble que, sinon toujours, du moins dans beaucoup de cas, ce procédé serait plus économique que les procédés de fonçage à l'aide de la poudre, pourvu que les outils, qui seraient d'ailleurs analogues aux trépans ordinaires, fussent convenablement disposés au-dessous de la plate-forme du disque, ou mouton en fonte, auquel ils seraient adaptés.

Moyen employé en Amérique, pour faire disparaître des rochers dans le lit des fleuves. — A l'appui des réflexions précédentes, je citerai le procédé ingénieux qui a été employé en Amérique, pour approfondir le chenal de navigation, dans des endroits où le lit de certains fleuves était encombré de rochers, en utilisant pour cela la force impulsive du courant. On a installé sur un bateau, un peu vers l'arrière, un arbre de couche horizontal débordant les bords du bateau par ses deux extrémités, dont chacune porte une roue à palettes immergée dans le courant. L'arbre est garni, dans la partie comprise entre les bords, de plusieurs rangées de cames, disposées comme celles de l'arbre d'un bocard. A l'avant du bateau sont disposées, sur une ligne perpendiculaire à l'axe, des flèches verticales en bois, armées à leur base d'un sabot en fer aciéré destiné à broyer le rocher par percussion; elles sont guidées, comme les flèches d'un bocard, par des moises ou prisons fixées à la charpente du bateau; elles sont soulevées alternativement par les cames placées sur l'arbre des roues, au moyen de leviers en bois, dont les points d'appui sont situés sur une ligne parallèle à l'arbre de la roue, entre les pilons et l'arbre, de sorte que les cames appuient sur une des extrémités de ces leviers ou bascules, dont l'autre extrémité soulève les flèches des pilons. Le bateau est muni d'un gouvernail.

Quand on veut détruire les rochers qui encombrent une portion du lit, et forment un *rapide*, on amarre le bateau, au moyen de cordages, à des points fixes placés sur le rivage, de manière que les armatures des pilons correspondent au point le plus bas du rapide. Comme les pilons sont à l'avant, le bateau se trouve alors tout entier, en dessous des rochers, dans un endroit où il peut flotter. L'impul-

sion du courant imprime un mouvement de rotation à l'arbre qui porte les roues et les cames, et le choc des pilons broie le rocher dont les débris sont entraînés par le courant. A mesure que le rocher est broyé sur une place, on remonte le bateau en se halant avec les cordages sur les points fixes. On le déplace aussi dans le sens transversal pour élargir le chenal. Un ou deux mariniers suffisent pour surveiller l'opération et manœuvrer le bateau, quand il doit être déplacé.

Quand les rochers ont été broyés sur une profondeur et une largeur suffisantes, pour ouvrir un chenal praticable à la navigation, il reste néanmoins un courant très-rapide que les bateaux ne peuvent remonter qu'à l'aide d'une force considérable. Le bateau qui a servi à détruire les rochers est alors utilisé comme remorqueur. On le débarrasse de sa batterie de pilons, et l'on remplace la garniture de cames par un tambour sur lequel s'enroule un câble amarré par le bout à un point fixe établi sur le rivage, en amont du rapide. Ce tambour peut, à volonté, être fixé sur l'arbre par une griffe d'embrayage, ou en être rendu indépendant, de manière à ce que l'arbre puisse tourner dans son intérieur. Quand on veut remonter un convoi de bateaux, le remorqueur étant au bas du rapide et les bateaux liés au remorqueur, on embraye le tambour; l'impulsion du courant sur les roues remonte le convoi. Quand celui-ci a franchi le rapide, il suffit de débrayer le tambour pour que le bateau descende, entraîné par le courant. On peut d'ailleurs modérer la vitesse à la descente en pressant la circonférence du tambour, entre les mâchoires d'un frein. (Babbage, *Economy of Manufactories*, 3e édition, p. 43.)

Il me suffira d'avoir présenté ces considérations. Des détails plus étendus sortiraient du cadre de cet ouvrage dont le but n'est point de proposer des méthodes nouvelles, mais d'exposer et de discuter celles qui sont connues et généralement adoptées.

Effets de la poudre sur les roches. — Je reviens au tirage des roches à la poudre. Il est impossible de présenter des données précises concernant les effets de la poudre. Ces effets varient avec les circonstances locales, qui changent elles-mêmes, non-seulement d'une mine à l'autre, mais d'un point à l'autre, dans la même mine. Je citerai donc simplement comme exemples, et en prévenant qu'on ne peut pas les prendre pour bases de devis exacts applicables partout, les faits suivants.

A Montmartre, dans les exploitations à ciel ouvert, ou par gradins dans des galeries de très-grandes dimensions, un demi-kilogramme de poudre arrache environ 8 mètres cubes de pierre à plâtre.

D'après M. Baillet de Belloy, dans des galeries de mines de petites

Digitized by Google

dimensions, 2 onces (125 grammes) de poudre détachent de 100 à 150 kilogrammes de roche quartzeuse.

A Ronchamps, 125 grammes de poudre suffisent pour abattre jusqu'à 4 mètres cubes de houille, après un havage préalable.

M. Babbage rapporte le fait suivant : un des blocs de calcaire extraits pour la construction du brise-lames de Plymouth, a 26 pieds 1/2 de long, sur 16 pieds de large et 13 d'épaisseur, en mesures anglaises. Pour détacher cette masse du poids d'environ 400,000 kilogrammes, on pétarda trois fois ; deux charges de 50 livres avoir-du-poids furent successivement placées dans un trou de 13 pieds de profondeur, 3 pouces de diamètre en haut et 2 1/2 au fond. Ces deux explosions déterminèrent une déchirure dans laquelle on mit un pétard de 100 livres de poudre, qui détacha la masse. Ainsi, chaque livre de poudre (453 grammes) détacha à peu près 2000 kilogrammes de roche.

Le général Burgoyne cite l'exemple suivant : dans les carrières de granite des environs de Kingstown, où les entrepreneurs doivent livrer des blocs de 40 à 60 pieds cubes chacun, on emploie souvent des charges de poudre de 50, 60 et 70 livres avoir-du-poids, qui remplissent aux 2/3 des trous de 3 1/2 à 4 pouces de diamètre, sur une vingtaine de pieds de profondeur. On choisit, pour cela, des points où la roche soit à découvert sur une surface verticale étendue, et on obtient généralement de fort grands effets. Ainsi, dans un trou de 5 pouces 1/2 ($0^m,14$) de diamètre, sur 19 pieds 7 pouces ($5^m,97$) de profondeur, on mit une charge de 75 livres ($34^{kil},01$) de poudre qui remplissait le trou, sur 8 pieds 10 pouces ($2^m,69$) de profondeur. La masse détachée ou largement fissurée cubait 1200 yards cubes (917 mètres cubes) et pesait 2400 tonneaux de 1000 kilogrammes.

La dépense fut de 6 livres 15 shillings 8 deniers (171 fr.), comme il suit :

	fr.	c.
2 mineurs pendant quatorze jours à 1 s. 8 d. (2 fr. 10 c.) par jour.	58	80
1 manœuvre pendant quatorze jours à 1 s. 6 d. (1 fr. 89 c.) par jour.	26	46
75 livres de poudre.	50	42
Étoupille de Bickford.	2	52
Fer, acier et main-d'œuvre du forgeron.	32	80
Total.	171	»

Bien entendu qu'il fallut plusieurs autres petits coups de mine, pour dépecer les énormes blocs détachés par la première explosion.

Digitized by Google

Nous citerons quelques autres exemples dans le chapitre où nous traiterons du creusement des excavations souterraines.

Mode d'excavation par le feu.

Mode de travail dans les mines de la Hongrie, d'après Delius.— La méthode du torréfiage des roches est fort ancienne et antérieure à l'introduction du travail à la poudre dans les mines. Elle est encore aujourd'hui usitée dans quelques localités où le prix des bois et la nature de la roche la rendent plus économique que l'emploi de la poudre. Les mines de Felsobanya en Hongrie, d'Altemberg en Saxe, du Rammelsberg, près Goslar, au Hartz, etc., sont dans ce cas. L'action du feu rompt l'adhérence des rochers et les fendille, par suite de la force élastique qu'acquièrent l'eau ou d'autres substances volatiles contenues dans leurs pores ou fissures naturelles, par l'accroissement de température. Les parties des roches désagrégées par le torréfiage se laissent facilement détacher au pic, quand elles ne tombent pas par leur propre poids. D'après Delius, le mode de travail usité aux mines de Felsobanya en Hongrie, est le suivant : pour torréfier le bout d'une galerie, on fait usage d'une grille de 25 pouces de longueur, 14 pouces de largeur à l'extrémité que l'on met en contact avec le rocher, et 23 pouces de largeur à l'extrémité opposée. Cette grille, portée sur quatre pieds, est un peu bombée et inclinée de l'arrière à l'avant, d'environ 9 pouces. Au-dessus et sur les faces sont des plaques de tôle. Après avoir chargé du bois sur la grille, on l'établit contre l'extrémité de la galerie vers le bas, et on allume le feu. La flamme se porte à l'avant contre la roche, et s'élève sur le front de la galerie. La fumée et l'air chaud sortent par la partie supérieure. Les ouvriers ont une fourche et un crochet à longs manches, pour retirer le feu ou remettre du bois sur la grille, en se tenant à une certaine distance du fourneau. Les *fig.* (1), *a*, *b*, *c*, *Pl. X*, prises dans l'ouvrage de Delius, représentent en plan et en coupe la grille ; *d* et *e* sont les plaques de tôle du dessus et des faces latérales ; *f*, *g*, la fourchette et le crochet.

La roche n'est ainsi torréfiée que sur une largeur de 2 pieds et 1/2 environ, et quelques pouces de profondeur. On détache les parties désagrégées, et on prolonge l'entaille, en répétant la même opération. Ordinairement on achève le sol à la poudre.

Pour élargir, on pose sur l'un des côtés de l'entaille, *fig.* 3 et 4, *Pl. X*, des bûchers formés de lits de bûches se croisant obliquement, et terminés en haut par des bûches inclinées vers le haut et appuyées

Digitized by Google

contre la roche. On répète la même opération de l'autre côté, et enfin on exhausse la galerie en dressant un bûcher formé de plusieurs lits de bûches croisées à angle droit, *fig.* 5, qui s'étend suivant l'axe de la galerie, et qu'on laisse entièrement découvert pour que la flamme agisse directement sur le faîte.

La *fig.* 6 représente les travaux d'exploitation intérieurs dans la mine de Felsobanya. On a divisé d'abord le gîte en longs massifs rectangulaires, par un système de galeries horizontales distantes de 9 toises, et de cheminées inclinées suivant le gîte, distantes de 40 à 50 toises. On établit les bûchers sur le sol des galeries horizontales, sur toute la distance qui sépare deux galeries inclinées, de manière que la flamme torréfie les roches au faîte de ces galeries. Lorsque le faîte est déjà trop élevé pour que la flamme des bûchers établis sur le sol des galeries puisse agir efficacement, on forme avec des pierres stériles un massif de hauteur convenable sur lequel on dépose les bûchers. Quand on a atteint une hauteur de 12 à 15 pieds, on fait un échafaud en bois de 6 pieds de hauteur, on le garnit de planches que l'on couvre de 2 ou 3 pieds d'épaisseur de pierre, pour les garantir de l'action du feu, et on établit les bûchers par dessus. A mesure que l'excavation s'élève, l'on exhausse aussi avec les pierres détachées antérieurement le sol des bûchers. Comme les roches détachées foisonnent, il faut en extraire une partie au dehors. On ménage à cet effet, à travers les débris de rochers amoncelés sur l'échafaudage, de petites cheminées murailiées en pierres sèches, et l'on jette les débris surabondants par ces trous ou cheminées de décharge. Arrivé à une petite distance de la galerie supérieure, on diminue la largeur de l'excavation, de manière qu'elle se termine en voûte, et on laisse un massif de l'épaisseur d'une toise environ. Les espaces ainsi excavés, demeurent vides après l'enlèvement des minerais, ce qui donne assez souvent lieu à des éboulements considérables.

Travail par le feu au Rammelsberg. — Le mode de travail usité à la mine du Rammelsberg, et décrit par M. Héron de Villefosse, est à peu près le même qu'à Felsobanya. Au Rammelsberg, on rejoint d'abord le gîte par des galeries qui arrivent au mur. A partir de ces galeries, on entaille à la poudre le mur sur une assez grande longueur, puis on pose sur ce mur un lit de bûches de sapin horizontales, pardessus lequel on établit d'autres bûches presque verticales, qui s'appuient sur le toit de minerai que l'on veut attaquer. On met le feu, et la flamme frappe ainsi directement la masse de minerai. Lorsque, après quelques opérations semblables, le toit est exhaussé, on construit sur le mur un terrassement en déblais sur lequel on pose un bû-

cher construit de la même manière. Après un certain nombre d'opérations, le toit prend la forme d'une voûte élevée; et alors, pour l'élargir encore, on amasse sur le sol des déblais qui s'élèvent au moins jusqu'à deux mètres de distance du dôme de la voûte. Sur ces déblais on construit le bûcher formé de lits de bûches horizontales en croix les unes sur les autres, et ayant la forme d'un parallélipipède à base rectangle. C'est ordinairement le samedi que l'on met le feu à tous les bûchers, en commençant par ceux établis dans les étages supérieurs; la mise en feu dure depuis quatre heures du matin jusqu'à trois heures du soir.

On laisse brûler, sans que personne descende dans la mine depuis le samedi jusqu'au lundi matin, jour auquel le garde-feu et ses aides achèvent d'éteindre le brasier. Le lundi on dispose encore quelques nouveaux bûchers dans les points où les premiers n'ont pas produit tout l'effet nécessaire. On les allume le soir, et le mardi matin on s'occupe d'extraire les minerais, de détacher les parties devenues ébouleuses, de trier le mineral, de remblayer et de préparer de nouveaux bûchers pour le samedi suivant. La chaleur est horrible dans la mine du Rammelsberg et les ouvriers y travaillent nus.

Excessive ténacité de la roche au Rammelsberg. — La ténacité du gite est très-considérable, particulièrement sur quelques points. M. de Villefosse rapporte qu'en 1808, on attaqua, sur un point, par un trou de fleuret, le mineral qui était une pyrite de fer et de cuivre très-compacte. Après 11 postes, c'est-à-dire 88 heures, d'un travail opiniâtre, l'ouvrier exactement surveillé n'avait pu pousser le trou qu'à la profondeur de 14 pouces, avait mis hors de service 12 fleurets, outre que 26 autres avaient été regarnis d'acier, et deux cent un aiguisés, et avait dépensé 6 livres un quart d'huile pour l'éclairage. Il avait fallu ensuite une demi-livre de poudre pour faire sauter la roche. Il résulte de ces faits que chaque pouce de profondeur du trou coûta à peu près 3 fr.

Au Rammelsberg, un atelier composé de quatre mineurs et deux ou trois aides extrait par semaine 40 tonnes de mineral de diverses natures, ayant chacune une capacité de 7 pieds cubes et demi (M. de Brunswick), et pesant :

	Quintaux.	Livres.
En minerai de plomb.	61	27
En minerai de cuivre.	5	89
En débris de bûches.	6	»»
En minerais vitrioliques.	3	15

Ces 40 tonnes coûtent tout compris 12 reichstallers et demi en exploitant par le feu, et coûteraient 38 à 40 reichsthalers en exploitant

à la poudre (le reichsthaler vaut 3 f. 70 c.). C'est l'État qui fournit le bois aux mines de Rammelsberg. Il n'est pas possible de tirer de là un renseignement précis, sur les dépenses relatives auxquelles donnerait lieu l'emploi des deux procédés dans d'autres localités.

Je trouve dans une brochure de Carl. Kock, publiée à Goslar en 1837, que les effets des foyers au Rammelsberg sont d'autant plus considérables que les minerais sont plus abondants et plus compactes dans la roche attaquée. Il est quelquefois arrivé qu'un bûcher de 100 pieds cubes de bois a produit mille quintaux et plus de minerai ; mais en général l'effet de la combustion d'un pareil bûcher est regardé comme satisfaisant, lorsqu'il donne un produit d'environ 100 quintaux.

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

EXCAVATIONS A CIEL OUVERT.

Dans quels cas on pratique des excavations à ciel ouvert. — Lorsque les gîtes que l'on veut exploiter sont situés, en tout ou en partie, à une médiocre profondeur au-dessous de la surface, et recouverts seulement par des terrains d'une ténacité assez peu considérable, le mode d'exploitation le plus économique et quelquefois même le seul possible, consiste à enlever les terrains supérieurs au gîte, pour le mettre entièrement à découvert. Les dépôts de tourbes, beaucoup de carrières de pierres, les dépôts de minerai d'étain d'alluvion, d'autres gîtes métalliques, et même quelques portions de couches de houille puissantes, sont exploités avec beaucoup d'avantages de cette manière. Ces exploitations à ciel ouvert donnent lieu à des excavations de fort grandes dimensions, et d'une profondeur souvent considérable.

Le mineur pratique aussi fréquemment des fossés ou tranchées à ciel ouvert, pour découvrir ou explorer des affleurements de gîtes, et quelquefois pour tenir lieu de galeries souterraines, qu'il faudrait creuser et maintenir ouvertes dans des terrains sans consistance, à une petite profondeur au-dessous de la surface. Les règles à suivre dans les exploitations à ciel ouvert, ne diffèrent pas en général de celles que l'on observe dans les travaux analogues exécutés par les ingénieurs militaires, ou les ingénieurs des ponts et chaussées.

Lorsque les excavations ne sont pas destinées à demeurer très-longtemps ouvertes, et doivent être comblées ou remblayées peu de temps après leur achèvement, ainsi que cela arrive dans beaucoup de cas, le mineur ne s'astreint pas à donner aux talus de ces excavations l'inclinaison nécessaire pour une durée indéfinie. Il se borne aux précautions indispensables pour la sécurité des ouvriers; et soutient les terres par des planches appliquées contre elles, maintenues par des étais transversaux en bois. Il ne construit des murs de revêtement susceptibles de procurer une durée indéfinie, que dans les tranchées destinées à rester ouvertes, comme celles qui prolongent, dans les terres meubles et peu profondes, des galeries d'écoulement. Dans ce dernier cas, si

les terres ne sont pas particulièrement ébouleuses, de simples murs de 0m,65 d'épaisseur, construits avec mortier hydraulique, et quelquefois même en pierre sèche, suffisent pour les soutenir. Quand les terres sont de nature à exercer une forte poussée, il est bien préférable d'établir dans la tranchée une voûte sur laquelle on rejette les terres qu'on a retroussées sur les bords, lors du creusement. C'est d'ailleurs le parti qu'il convient de prendre toutes les fois que la tranchée a une profondeur un peu considérable.

Nous reviendrons sur les moyens de soutenement provisoire des parois de la tranchée, et l'exécution de la voûte, en traitant des excavations souterraines.

Principes généraux à suivre, dans les exploitations à ciel ouvert. — Dans les exploitations à ciel ouvert proprement dites, on se dirige généralement d'après les principes qui suivent :

1° Il faut mettre préalablement à découvert une partie suffisamment étendue du gîte exploitable, pour que l'on puisse abattre et extraire facilement les substances à exploiter, et s'enfoncer soit jusqu'au mur du gîte, lorsque celui-ci est une couche horizontale, ou un amas circonscrit de toutes parts, soit jusqu'à de grandes profondeurs, quand il est en bancs inclinés, sans être gêné par les éboulements des parois de l'excavation.

2° Se ménager les moyens d'épuiser les eaux, quand il doit s'en ramasser au fond de l'excavation, et pour cela les réunir toutes dans un puisard situé à la partie la plus basse, sur lequel on aura installé les pompes ou moyens d'épuisement; souvent ce puisard sera creusé en dehors de l'excavation principale, et mis en communication avec son fond, par un aqueduc, ou galerie souterraine.

3° Quand la première entaille est épuisée, on la remblaye généralement avec les terres provenant de la découverte de la partie contiguë du gîte, et l'on ménage sous les remblais un aqueduc ou galerie qui continue de conduire les eaux au puisard.

4° La position de la première entaille, l'ordre à suivre dans les travaux, dépendent à la fois et de la forme du gîte et de la forme de la surface du sol. Ainsi on conçoit qu'en pays de montagnes, on attaquera sur les pentes, afin de rendre le transport et la décharge des déblais plus économiques, l'abattage des terres plus facile, et d'obtenir un écoulement naturel des eaux. Dans le fond des vallées, pour des gîtes à peu près horizontaux, on devra évidemment commencer au bas des vallées, afin de se ménager la pente nécessaire à l'écoulement ultérieur des eaux, et faciliter les mouvements de terres, et

Digitized by Google

on exploitera par tranches transversales perpendiculaires à l'axe longitudinal du gîte, en remontant.

On sent au reste que la disposition des travaux doit être variée à l'infini, avec la topograpbie du pays, l'allure, la consistance du gîte. Pour arrêter le système d'exploitation le plus économique dans chaque cas, il est indispensable de s'être procuré, par une étude antérieure, et au besoin par des travaux de recherche préliminaires, des connaissances précises sur la forme du gîte et surtout sa profondeur en divers points au-dessous de la surface du sol : si l'on possède des données assez certaines pour pouvoir se représenter fidèlement, à l'aide de plans et de profils, le relief de la contrée, du gîte et du terrain qui le recouvre, il sera difficile que les lumières du simple bon sens ne conduisent pas celui qui aura quelque habitude des travaux au système qui sera le mieux adapté aux localités. L'essentiel est ici, comme du reste dans les cas les plus difficiles, de ne pas commencer les travaux au hasard, avec une connaissance erronée ou imparfaite du gîte, mais de procéder d'après un plan mûrement étudié, bien arrêté à l'avance, auquel les faits découverts pendant l'exploitation même ne pourront apporter que des modifications de détail.

Organisation des ateliers de déblayement des terres. — Les travaux de déblayement des terres constituent la partie la plus considérable des frais de la plupart des exploitations à ciel ouvert. Ils occupent généralement un grand nombre d'ouvriers, et il importe de les organiser de la manière la plus économique.

Dans le déblayement des terres, il y a trois opérations distinctes, savoir : l'abattage et le piochage des terres, quand elles ont assez de consistance pour qu'elles ne puissent pas être prises directement à la pelle ou au louchet; le chargement dans les vases, brouettes, tombereaux, camions ou wagons; le transport.

Les nombres d'ouvriers employés à ces trois genres d'ouvrages doivent être dans un rapport tel, qu'il n'y ait point d'arrêt, ni de suspension de travail pour aucun d'eux. Les piocheurs doivent fournir de la terre aux chargeurs, ceux-ci doivent avoir toujours des vases à remplir, et enfin les hommes employés au transport, les rouleurs, doivent trouver, en arrivant à l'atelier de déblayement avec un vase vide, un autre vase entièrement plein et prêt à partir. Il résulte de là que les rapports entre les nombres de piocheurs, de chargeurs et de rouleurs doit être déterminé d'après la nature des terres, la capacité des vases employés au transport, les temps nécessaires pour remplir ces vases et les pousser à une distance déterminée.

Transport des terres à la brouette. — Le transport des terres s'exé-

cute le plus habituellement dans des brouettes, lorsque les distances à parcourir sont petites et que les masses de terres à déblayer ne sont pas très-considérables. Les bases d'après lesquelles on règle les travaux de déblayement à la brouette sont encore celles qui résultent des observations de Vauban. On admet que la brouette peut recevoir un trentième de mètre cube de terre mesurée sur place, ce qui, eu égard au foisonnement des terres piochées, nécessite une capacité d'un demi-hectolitre environ. Un ouvrier peut transporter, dans sa journée, 15 mètres cubes à une distance de 30 mètres, en plaine, c'est-à-dire qu'il fait 450 voyages à cette distance, et parcourt 27,000 mètres, dont moitié en poussant la brouette chargée et moitié avec la brouette vide. Enfin, un homme peut remplir une brouette de terres meubles, dans le temps nécessaire à un rouleur pour parcourir une distance de 30 mètres, en plaine, avec une brouette pleine et revenir avec une brouette vide. Il résulte de là que, pour la bonne conduite du travail, il faudra diviser la distance totale à laquelle les terres doivent être portées, en relais de 30 mètres chacun; placer sur chaque relai un certain nombre de rouleurs, qui prendront les brouettes pleines amenées par les rouleurs du relai précédent, et remettront à ceux-ci les brouettes vides qu'ils auront reçues des rouleurs du relai suivant; placer à l'atelier de chargement un nombre de chargeurs égal à celui des rouleurs, divisé par le nombre des relais de 30 mètres, et avoir un nombre de brouettes égal au nombre total des chargeurs et des rouleurs. De cette façon les brouettes vides ramenées à l'atelier de chargement par les rouleurs du premier relai seront remplies pendant le temps que ces rouleurs mettront à conduire les brouettes pleines qu'ils auront trouvées à l'atelier, et à y ramener d'autres brouettes vides.

Si les terres à déblayer ne sont pas naturellement meubles, il faudra, indépendamment des chargeurs, avoir un certain nombre de piocheurs qui dépendra de la nature des terres, et que l'on déterminera par une ou plusieurs expériences préliminaires.

Dans les travaux du génie militaire, on apprécie la qualité de la terre, sous le rapport de la difficulté de la fouille, de la manière suivante: l'entrepreneur des travaux fournit un ouvrier chargeur, et l'officier du génie un ouvrier piocheur. Après que celui-ci a travaillé pendant un certain temps, dont on tient note, la terre qu'il a fouillée est chargée et mise dans des brouettes par l'ouvrier chargeur de l'entrepreneur : on tient note du temps. Soient t le temps employé à la fouille, t' le temps employé au chargement de la terre fouillée; le rapport $\frac{t}{t'}$ est celui qui doit exister entre le nombre de piocheurs et

celui des chargeurs pour que les premiers puissent fournir constamment de la terre aux seconds. Quand le rapport $\frac{t}{t'} = 1$, on dit que la terre est *à deux hommes à la fouille*, quand $\frac{t}{t'} = 1\ 1/2$, on dit que la terre est *à deux hommes et demi à la fouille*, il faut alors trois piocheurs pour deux chargeurs à l'atelier; si $\frac{t}{t'} = 2$, la terre est dite *à trois hommes à la fouille*; il faut deux piocheurs pour un chargeur et ainsi de suite. Les terres qui n'ont pas besoin d'être piochées sont *à un homme à la fouille*. Si l'on ajoute à ces données la connaissance du prix de la journée de l'ouvrier et l'usure des outils, on aura tous les éléments de la détermination des prix de revient du mètre cube de déblai.

Ce que nous venons de dire se rapporte aux distances parcourues en plaine. Si les transports ont lieu en descendant, suivant une pente qui ne soit pas trop roide, pour que la remonte de la brouette soit trop pénible, on calcule comme en plaine. Si les transports doivent avoir lieu en montant, il convient d'établir les rampes de façon qu'elles n'aient pas plus d'un douzième de pente, et l'on admet qu'un relai en rampe inclinée au douzième, de 20 mètres de base ou de distance horizontale, équivaut à un relai de 30 mètres en plaine.

Il y a avantage à augmenter la capacité des brouettes. — Les évaluations ci-dessus sont celles de Vauban et de Coulomb. Ce dernier estime à 70 kilogrammes le poids du contenu d'une brouette à 30 kilogrammes le poids de la brouette vide, à 18 ou 20 kilogrammes la pression sur le bras de l'ouvrier rouleur, et à 2 ou 3 kilogrammes la force nécessaire pour la pousser sur un terrain sec et uni. J'ai vu employer, dans quelques ateliers d'exploitation à ciel ouvert, des brouettes d'une capacité plus grande, avec beaucoup d'avantage. En roulant sur un chemin bien sec, que l'on couvre au besoin de mauvaises planches, et en donnant une légère inclinaison du côté où les terres doivent être transportées, on peut employer des brouettes, dont le poids n'excédera guère 30 kilogrammes, et dont chacune contiendra un vingtième de mètre cube de terre mesurée sur le terrain, ou trois quarts d'hectolitre environ y compris le foisonnement; le poids sera d'environ 100 kilogrammes. L'ouvrier n'en parcourra pas moins de 27,000 mètres dans sa journée de travail et pourra faire 300 voyages, aller et retour, à une distance de 45 mètres. Pendant que le rouleur parcourra deux fois cette distance, un chargeur aura rempli une

autre brouette. Il conviendra, dans ce cas, de diviser la distance en relais de 45 mètres de longueur.

Les travaux de déblaiement, dans l'exploitation du dépôt de minerai d'étain d'alluvion de Pentowan, dans le Cornouailles, sont exécutés avec des brouettes d'une capacité à peu près égale à celle que je viens d'indiquer, et en comparant le prix payé à l'entreprise pour le transport de la toise cube de déblais, à la distance moyenne parcourue, et au salaire des ouvriers du pays, je me suis assuré que le travail journalier du rouleur devait être au moins de 15 mètres cubes transportés à 45 mètres. Les terres sont principalement composées de sables quartzeux et par conséquent d'un poids spécifique plutôt supérieur qu'inférieur aux terres ordinaires. Le roulage a lieu sur les banquettes légèrement inclinées dans le sens du transport, suivant lesquelles sont taillées les parois latérales de l'excavation. Il est évident, au surplus, qu'une grande partie du travail du rouleur consistant dans le transport de son propre poids, il y a avantage à augmenter, autant que le permet la force de l'ouvrier et la nature du sol, la capacité du vase, dans lequel s'exécutent les transports, et dont le poids est loin d'augmenter proportionnellement à sa capacité.

La brouette est employée dans presque toutes les exploitations de tourbières et de carrières à ciel ouvert peu étendues. On se sert, quand les distances à parcourir sont un peu plus grandes, de tombereaux traînés par des chevaux, et presque toujours on emploie des waggons roulant sur des rails en fer, lorsque les masses de terres à déblayer sont considérables.

Déblais au tombereau. — Les tombereaux ordinaires attelés d'un cheval de force médiocre, contiennent ordinairement 5 hectolitres de terres. Avec de bons chemins et de forts chevaux, on peut donner à la caisse du tombereau, une capacité de 8 hectolitres. Le chargement des terres dans les tombereaux est plus pénible que dans les brouettes, et l'on estime qu'un ouvrier ne peut charger que 12 mètres cubes de terres ameublies dans sa journée.

On estime en outre que le cheval parcourt moyennement, en traînant le tombereau chargé et revenant à vide, une distance de 40 à 50 mètres par minute ; on emploie deux minutes à vider un tombereau, et à le remettre en marche.

On peut compter 10 heures de travail effectif des terrassiers, piocheurs ou chargeurs dans la journée, et admettre une durée égale pour le travail du cheval, ce travail étant toutefois interrompu, pendant la durée du chargement du tombereau à l'atelier, qui sera un quart, ou au moins un cinquième de la durée totale de la journée, de telle sorte

Digitized by Google

que, sur les 10 heures de travail, le cheval ne soit en marche que pendant 8 heures au plus. L'espace total qu'il parcourt dépendra du nombre de déchargements dont chacun prend à peu près deux minutes. En supposant par exemple que les terres soient transportées à 1000 mètres de distance, et que le cheval soit en mouvement pendant huit heures, les deux autres heures étant employées au chargement du tombereau, il emploierait à peu près $\frac{2000}{45} = 44', 44$ à parcourir deux fois la distance de 1000 mètres, et 46 minutes et demie à faire le voyage entier, y compris le temps du déchargement. Il ferait donc dix voyages par jour et parcourrait une distance totale de 20,000 mètres moitié avec le tombereau chargé, moitié à vide. On peut admettre qu'un seul terrassier emploierait $\frac{10}{12}$ d'heure, ou cinquante minutes à charger un mètre cube de terre dans des tombereaux, ou 5 minutes à charger un hectolitre, et qu'ainsi la durée du chargement de chaque tombereau est égale en désignant par N la capacité du tombereau en hectolitres, et par n le nombre des chargeurs à $5 \times \frac{N}{n}$ minutes.

Enfin on peut employer 3 ou 4 chargeurs, au plus, à jeter de la terre dans un tombereau. On organisera, d'après les bases précédentes, l'atelier de déblaiement avec des tombereaux, de telle sorte que les chargeurs à l'atelier soient constamment occupés, et que la durée du chargement de chaque tombereau ne soit pas plus du quart de la durée d'un voyage, aller et retour. Le conducteur des tombereaux pourra aider au chargement, pendant que son cheval se repose et être compté comme un chargeur. Ainsi les terres étant conduites à 1,000 mètres, chaque voyage durera $\frac{2000}{45} + 2 = 46$ minutes $\frac{44}{100}$: la durée du chargement du tombereau devra être tout au plus le quart de cela, c'est-à-dire de 12 minutes et demie.

Si la capacité du tombereau est de 8 hectolitres, trois chargeurs constamment à l'atelier, et le conducteur rempliraient ce tombereau dans $5 \times \frac{8}{4}$ 10 minutes.

Si on ne met que deux chargeurs constamment à l'atelier, la durée du chargement sera de $5 \times \frac{8}{3} = 13$ minutes.

On peut admettre ce nombre. Chaque tombereau fera alors 10 voyages par jour : pour que les chargeurs soient constamment occu-

pés, il faudra évidemment employer un nombre de tombereaux, que l'on obtiendra en divisant la durée totale d'un voyage par la durée du chargement. De cette façon un tombereau vide serait de retour à l'atelier, au moment où un tombereau plein en partirait; il faudrait donc ici $\frac{46,44}{13} = 3\ 1/2$, 3 tombereaux et demi, pour 2 chargeurs constamment à l'atelier, ou 7 tombereaux pour 4 chargeurs.

Le nombre des piocheurs sera d'ailleurs déterminé d'après la nature et la consistance des terres, comme dans le cas des déblais à la brouette.

A cette distance de 1000 mètres, si les transports se fesaient à la brouette, il faudrait 33 rouleurs et un chargeur, en tout 34 terrassiers pour charger et transporter 15 mètres cubes de terres.

Admettant que le prix de la journée du terrassier fût de 1 fr. 50 c., le prix du déblaiement serait par mètre cube, de $\frac{34 \times 1,50}{15} = 3$ fr. 40 c.: en employant des tombereaux d'une capacité de 8 hectolitres chacun, traînés par de forts chevaux, 7 tombereaux et 4 chargeurs à l'atelier suffiraient pour charger et transporter à la même distance $70 \times 0,8 = 56$ mètres cubes de terres dans une journée.

Si la location du cheval, du tombereau, et le salaire du charretier coûtent 6 fr. par jour,

Les dépenses seraient

	fr.	c.
Pour les sept tombereaux et les conducteurs. . . .	42	»
Pour les quatre chargeurs à 1 fr. 50 c..	6	50
Total.	48	»

Le prix par mètre cube serait donc de $\frac{48}{56} = 0^{fr.},857$.

Si les chevaux étaient faibles, ou les chemins mauvais, de telle sorte qu'on ne pût employer que des tombereaux d'une capacité de 5 hectolitres, on serait conduit par les considérations précédentes à diminuer le nombre des chargeurs à l'atelier correspondant à un même nombre de tombereaux. Ainsi 2 hommes, savoir le chargeur à l'atelier, et le conducteur auraient chargé le tombereau en 12 minutes et demi, ce qui est à peu près le quart de la durée complète d'un voyage à 1000 mètres. On aurait donc un chargeur à l'atelier, pour 4 tombereaux, les conducteurs aidant au chargement.

Les 4 tombereaux feraient toujours 10 voyages chacun dans la journée, et transporteraient seulement 20 mètres cubes à 1000 mètres. Les dépenses de chargement et de transport seraient:

		fr.	
Pour quatre tombereaux et les conducteurs à 6 fr.	.	24	».
Pour un terrassier à l'atelier.	. . . .	1	50
Total.	.	25	50

Et par mètre cube $\frac{25,50}{20} = 1$ fr. 275.

On peut regarder, dans les hypothèses des prix que nous avons admis, les deux chiffres 1 fr. 275 et 0 fr. 857 comme les deux limites entre lesquelles se trouvera compris le prix du mètre cube de déblais, au tombereau, pour le chargement et le transport. Il faudra ensuite y ajouter le prix de la fouille et l'entretien des outils. On évalue l'entretien des outils à un dixième à peu près de la dépense totale.

Je ne m'arrêterai pas à déterminer la distance à laquelle le transport à la brouette devient plus économique que le transport au tombereau. Cette distance, toujours fort restreinte, sera facile à déterminer dans chaque localité.

Transport des terres sur des chemins de fer. — Pour peu que les masses de terres à déblayer soient considérables, dès qu'elles doivent être transportées à une distance de 200 à 300 mètres, il y a une grande économie à établir des chemins de fer, sur lesquels circulent des waggons, poussés par des hommes, ou traînés par des chevaux, et dont la capacité varie depuis huit jusqu'à vingt et même trente hectolitres, suivant la pente du chemin, les dimensions des rails, et la facilité du chargement.

Les waggons de déblaiement ont en général des roues d'un diamètre plus petit que les waggons qni parcourent les grands chemins de fer ordinaires, afin de rendre le chargement plus facile. Les caisses sont disposées de manière à basculer autour d'un axe horizontal, qui est parallèle aux essieux, quand on veut verser les terres sur le devant, et qui est perpendiculaire aux essieux, quand on veut les verser sur les côtés. On a ordinairement, dans un atelier de déblaiement, des waggons des deux espèces, afin de pouvoir prolonger le remblai en avant de l'extrémité du chemin de fer, et l'élargir sur les côtés.

Les rails qui ne diffèrent pas, pour la forme, des rails des chemins de fer ordinaires, sont habituellement assujettis au moyen de *chairs*, supports en fonte, sur des pièces de bois posées transversalement sur les remblais. Les *fig.* 9 et 10, *Pl.* X, représentent deux waggons, dont les caisses basculent à l'avant, *fig.* 10, et sur les côtés, *fig.* 9. Des rails en fer forgé du poids de 14 à 16 kilogrammes au mètre courant, posés sur des supports espacés de mètre en mètre, suffisent

parfaitement pour porter des waggons contenant un mètre cube et demi de terre, dont le poids est d'environ 3000 kilogrammes. On aura souvent à tourner dans des courbes d'un rayon extrêmement court, ce qui forcera de rapprocher les essieux des waggons, et de recourir aux autres moyens particuliers que nous décrirons, en traitant du transport des minerais dans les mines ou à la surface. Nous conseillerons de ne jamais employer, pour les travaux de déblaiement, des rails en fonte à rebords, comme ceux des chemins à ornières creuses ou *tramm roads*, parce que ces rails se rempliraient de terre et de débris qui occasionneraient une résistance notable, et seraient beaucoup moins faciles à nettoyer que les rails saillants en fer forgé.

La *fig.* 12, *Pl.* X, représente les rails et les supports du chemin de Redruth, dans le comté de Cornwall, qui sert au transport des minerais d'étain et de cuivre, depuis les mines jusqu'au port d'embarquement. La hauteur totale est de 3 pouces anglais (0^m,076). La plus grande largeur est de 1 pouce 1/8 de pouce (0^m,029). La plus petite largeur correspondante à la double échancrure qui se trouve au milieu de la hauteur est de 7/8 de pouce (0^m,022). La hauteur de ces échancrures est de 3/4 de pouce (0^m,019).

Ces rails pèsent à peu près 14 kilogrammes au mètre courant; ils sont posés sur des *chairs* ou supports en fonte espacés de 0^m,91. Les rebords latéraux du *chair* présentent deux échancrures qui correspondent à celles du rail. Deux clavettes placées une de chaque côté et qui remplissent à la fois les échancrures en regard du rail et du chair, assujettissent le rail. Chaque chair pèse 8 livres avoir-du-pois ($3^{kil.}$,62). Les rails, quand ils sont usés d'un côté, peuvent être retournés.

On peut, à défaut de rails, employer de simples barres de fer plat, de 7 à 8 centimètres de hauteur sur 2 1/2 centimètres d'épaisseur, posées de champ, soit dans des supports en fonte, où elles sont serrées avec des coins de bois plats et minces, soit dans des entailles pratiquées dans les traverses en bois qui portent les rails, et serrées dans ces entailles par de gros coins de bois. Nous renvoyons pour les détails de construction des embranchements et des waggons, au chapitre où nous traiterons du transport des minerais dans les mines ou à la surface.

Nous nous bornerons à citer ici quelques exemples propres à faire apprécier le prix de revient des travaux de déblaiement exécutés avec des waggons circulant sur des chemins de fer.

Dans la construction du chemin de fer d'Andrezieux à Roanne, on a employé pour les terrassements, de petits waggons dont les roues

avaient un diamètre de $0^m,34$ et les essieux un diamètre de $0^m,04$. Les caisses remplies comble portaient 1,500 kilogrammes de terre. Le waggon avec ses roues pesait 300 kilogrammes. Un cheval traînait sur une rampe inclinée de 5 centimètres par mètre, un waggon semblable, et faisait quarante voyages par jour à une distance de 200 mètres.

Sur le chemin de fer de Saint-Etienne à Lyon, on a employé des waggons contenant $1^{m. cube},60$ de terre, dont le poids était de 5000 kilogrammes. Le waggon vide pesait 1200 kilogrammes. Un cheval conduisant un waggon semblable sur une pente inclinée de 1/75, fesait seize voyages par jour, à une distance de 1300 mètres. Le waggon descendait par l'action seule de la gravité, de sorte que le cheval n'avait d'effort à faire que pour remonter le waggon vide. Le transport du mètre cube de déblai à 1300 mètres de distance revenait à environ 0 fr. 33 c.

Pour le déblaiement des terres qui recouvrent la couche de houille de Lagrange à Decazeville (Aveyron), le prix de la fouille des terres et du transport à 400 ou 500 mètres de distance, ne revient pas à plus de 0 fr. 50 c. le mètre cube mesuré en déblai, pour le salaire des ouvriers; les exploitants demeurent en outre chargés de la pose du chemin de fer; de la construction des waggons et de leur entretien, dépense qui ne s'élève pas à 0 fr. 10 c. par mètre cube. Les waggons contiennent 2 mètres cubes et sont poussés par des hommes. Les terres sont généralement argileuses et compactes, quelquefois mêlées de nerfs schisteux qui recouvrent la couche. L'abattage et le chargement sont facilités par les localités, attendu que l'on attaque les terres sur une hauteur verticale d'une douzaine de mètres, sur le flanc d'une montagne, et que les waggons arrivent pour être chargés au pied de l'escarpement. Cette circonstance a permis d'augmenter le diamètre des roues en fonte des waggons, qui est d'environ 1 mètre. Les rails dont on se sert sont des rails de rebut fabriqués dans l'usine, pour le chemin de fer de Bordeaux à la Teste, et dont le poids, est, je crois, de 20 kilogrammes au mètre courant. Le chemin de fer est posé sur les remblais, et le contenu des waggons est vidé à l'extrémité du remblai qui a une hauteur de 8 à 10 mètres. Pour faciliter le versement, on continue le chemin de fer posé sur les remblais, au moyen d'un système de charpente composé de longues poutres portant par une de leurs extrémités sur les remblais récents, et de l'autre bout sur deux poteaux en bois inclinés, appuyés par leur pied sur le sol ferme et consolidés par un système de moises obliques en croix de Saint-André. Les rails sont posés sur les poutres horizontales, ou lé-

gèrement inclinées du côté de la charpente, lesquelles sont réunies par quelques moises transversales, et les waggons sont poussés ainsi jusqu'au delà du bord du remblai où on les vide, les uns se vidant en avant, les autres sur les côtés. Lorsque les supports antérieurs de l'échafaudage commencent à être pris dans les remblais, on déplace la charpente pour la rapporter plus loin. On a sur le front du remblai deux charpentes semblables vers lesquelles se bifurque la ligne du chemin de fer, pour que le travail de déblaiement ne soit pas interrompu par la nécessité de déplacer l'un des échafaudages.

Talus ou inclinaison que l'on doit donner aux parois des excavations. — Les parois latérales des excavations profondes doivent être taillées de manière à prévenir les éboulements qui gêneraient la suite des travaux, et seraient d'ailleurs une cause de danger très-grave pour les ouvriers.

Les excavations peuvent être ouvertes dans des terrains composés de roches solides, ou dans des terres plus ou moins ébouleuses.

Dans les terrains composés de roches solides, les parois des tranchées peuvent être taillées à pic, toutes les fois que les roches sont compactes ou stratifiées horizontalement. La solidité est alors complète, sauf les dégradations qui peuvent provenir de l'altération des roches par suite de leur exposition à l'air. Ces dégradations ne se font sentir en général qu'à une petite profondeur, et ne donnent lieu qu'à des éboulements peu considérables dont les effets ne sont pas à redouter.

Quand les terrains sont stratifiés et composés d'assises inclinées à l'horizon, il convient de placer l'excavation de manière que deux de ses parois soient perpendiculaires et les deux autres parallèles à la direction des couches. Trois parois peuvent être généralement taillées à pic, savoir les deux qui sont disposées perpendiculairement à la direction, et celle qui étant parallèle à la direction, laisse l'aval pendage des couches coupées engagé dans le massif de terrain latéral. Quant à l'autre paroi, si elle était coupée à pic, il pourrait arriver que les assises supérieures dont le pied a été coupé dans le creusement, glissassent sur les assises qui les supportent, vinssent encombrer l'excavation et occasionner des accidents graves. Cela arriverait même infailliblement, dans le cas où les assises successives ne seraient pas adhérentes entre elles, comme cela arrive fréquemment. Il faut alors prendre beaucoup de précautions, et souvent on est obligé de tailler la quatrième paroi suivant le plan même des couches, de manière qu'aucune des assises restées en place ne soit coupée à sa base. C'est ce que l'on fait presque toujours, quand l'inclinaison des couches

est forte et dépasse 70 à 80°, à moins que ces couches n'adhèrent fortement les unes aux autres, auquel cas cette paroi pourrait, sans inconvénient, être aussi taillée à pic.

Quand les excavations sont ouvertes dans des terres ou argiles plus ou moins consistantes, les parois doivent être coupées suivant des talus dont l'inclinaison varie avec la nature des terres.

On sait par expérience que les sables les plus fins, sans aucune cohésion, prennent, quand ils sont jetés à la pelle, un talus de 5 de base sur 3 à 4 de hauteur, et que les terres argileuses fortes forment, lorsque la cohésion est également détruite, un talus de 5 de base sur 7 de hauteur verticale.

On pourra compter, dans la pratique de l'exploitation des mines et lorsque les talus ne devront pas subsister longtemps, que les terres les plus mauvaises pourront être coupées sans danger, quelle que soit la hauteur, suivant un talus de 45°, un de base sur un de hauteur; et dans le cas des terres argileuses fortes, on pourra tailler les terres suivant un talus de 5 de base sur 7 de hauteur : le plus souvent même cette dernière limite est dépassée sans inconvénient, parce que la cohésion des terres est loin d'être nulle et qu'elles se laissent couper à pic, sans éboulement, sur une hauteur verticale de plusieurs mètres.

Sans entrer ici dans des détails circonstanciés sur l'équilibre des massifs de terres, pour lesquels je renvoie le lecteur au résumé des leçons de M. Navier sur l'application de la mécanique à l'art des constructions, je me bornerai à rappeler les principes généraux de la question.

Lorsqu'un massif de terre, limité en-dessus par une surface plane horizontale, est coupé latéralement, la pesanteur qui tend à produire l'éboulement est contre-balancée par le frottement et par la cohésion des terres. Pour que l'équilibre subsiste, il est nécessaire de couper les terres suivant un talus, dont l'angle avec le plan vertical est d'autant plus grand que ces forces résistantes sont moindres.

On admet que la force de frottement est proportionnelle à la pression, et que la force de cohésion est proportionnelle à l'étendue des surfaces en contact. On peut déterminer, par des expériences qui seront indiquées plus loin, pour chaque espèce de terre, le rapport du frottement à la pression, et la force de cohésion par mètre carré superficiel.

En désignant par f le rapport du frottement à la pression pour les terres que l'on considère, par γ la force de cohésion par mètre carré superficiel, par π le poids du mètre cube de terre, par h la hauteur

verticale de la coupure faite dans le massif, par τ le plus petit angle que le plan du talus puisse faire avec le plan vertical, sans que l'équilibre soit détruit, on démontre que l'angle τ est déterminé par l'équation suivante :

$$\text{tang}\,\tau = \frac{1}{f} - \frac{2}{f^2}\left\{\sqrt{\frac{2\gamma}{\pi h}\left(\frac{2\gamma}{\pi h} + f\right)(+f^2)} - \frac{2\gamma}{\pi h}\right\}. \qquad \text{(A)}$$

Si, dans cette formule, on suppose la force de cohésion nulle, $\gamma = 0$, elle se réduit à

$$\text{tang}\,\tau = \frac{1}{f},$$

et l'angle du talus *stable* est indépendant de la hauteur h de la coupure.

De là résulte un moyen facile de déterminer la valeur de f par l'expérience. Il suffit de détruire la cohésion des terres, en les piochant, et d'observer le talus qu'elles prennent naturellement, à la suite d'un grand éboulement. Le rapport f est la cotangente de l'angle que le talus que prennent naturellement les terres sans cohésion, forme avec le plan vertical, ou la tangente de l'angle compris entre le même talus est le plan horizontal. Il faut avoir soin seulement de ne pas expérimenter trop en petit, et par conséquent, il faut ou observer le talus naturel que prennent les terres dans un éboulement considérable, si on a occasion de faire une semblable observation, ou mesurer l'angle formé par une masse de remblais d'une assez grande hauteur.

Quand on a déterminé la valeur de f, on détermine la force de cohésion γ, en cherchant la limite de la hauteur sur laquelle les terres peuvent être coupées à pic, sans éboulement. En effet, si l'on suppose le massif coupé verticalement, l'angle τ de la formule (A) est nul. On a donc tang $\tau = 0$. Or, quand tang $\tau = 0$, il vient :

$$1 = \frac{2}{f}\left\{\sqrt{\frac{2\gamma}{\pi h}\left(\frac{2\gamma}{\pi h} + f\right)(1+f^2)} - \frac{2\gamma}{\pi h}\right\},$$

équation qui, résolue par rapport à γ, donne :

$$\gamma = \frac{\pi h}{4\left(f + \sqrt{1+f^2}\right)}.$$

Si donc on a observé la plus grande hauteur verticale h sur laquelle les terres peuvent être coupées à pic sans éboulement, on aura la force de cohésion sur l'unité superficielle, en divisant le poids du prisme de terre qui a pour base cette même unité superficielle, et pour hauteur la hauteur observée, par le nombre $4\left(f+\sqrt{1+f^2}\right)$, qui est connu, puisque f a été préalablement déterminé.

D'après les observations de divers auteurs citées par M. Navier (ouvrage cité), le poids du mètre cube de terres varie de 1400 à 1900 kilogrammes.

Les résultats moyens sont contenus dans le tableau suivant :

	Kilogrammes.
Terre végétale.	1400
Terre franche.	1500
Terre argileuse.	1600
Glaise	1900
Sable terreux.	1700
Sable quartzeux pur.	1900

Le sable fin et sec est, de toutes les terres, celle qui prend le plus grand talus. Ce talus forme avec l'horizon un angle de 34 à 35°, ce qui donne pour la valeur de f relative à cette matière,

$$f = \text{à peu près tang } 35° = 0{,}70.$$

Pour la terre ordinaire, bien sèche et pulvérisée, l'angle du talus naturel avec l'horizon est au moins de 46° 50′

$$f = \text{tang } 46°\,50' = 1{,}066.$$

Pour la même terre légèrement humectée, cet angle augmente et devient au plus égal à 54°, ce qui donne :

$$f = \text{tang } 54° = 1{,}38.$$

Enfin, pour l'espèce de terre la plus dense et la plus compacte, le talus naturel est, d'après Barlow, de 5 de base sur 7 de hauteur, ce qui donne :

$$f = \frac{7}{5} = 1{,}4.$$

Quant à la valeur de γ, il est peu de terres argileuses qui ne puissent être coupées à pic, sur un mètre de hauteur verticale, sans

éboulement. Ainsi, en supposant, pour la terre légèrement argileuse, presque de la terre franche, que le poids du mètre cube soit de 1500 kilogrammes, que $f = 1{,}38$, et qu'elle se soutienne à pic sur un mètre de hauteur, on a pour la cohésion par mètre carré superficiel :

$$\gamma = \frac{1500}{4\left(1{,}38 + \sqrt{1 + \overline{1{,}38}^2}\right)} = 122 \text{ kilogrammes.}$$

Les terres les plus compactes peuvent se soutenir à pic sur 4 mètres de hauteur. En supposant que leur poids soit de 1800 kilogrammes au mètre cube, et que $f = 1{,}4$, on a :

$$\gamma = \frac{1800 \times 4}{4\left(1{,}4 + \sqrt{1 + \overline{1{,}4}^2}\right)} = 580 \text{ kilogrammes.}$$

Les valeurs de l'angle τ correspondantes à diverses hauteurs et aux conditions $f = 1{,}38$, $\gamma = 122$ k. et $\pi = 1500$ k. qui conviennent aux terres ordinaires, dites terres franches, sont consignées dans le tableau suivant.

Hauteurs verticales des terres coupées.	Angles minima d'inclinaison du talus sur le plan vertical pour la stabilité.	Rapports de la base à la hauteur verticale du talus.	Bases des talus correspondantes aux hauteurs.
mètres.			mètres.
1	0	0	0
1,50	6° 54′	0,121	0,18
2	10° 56′	0,193	0,39
2,50	13° 18′	0,236	0,59
3	15° 47′	0,283	0,75
4	18° 39′	0,337	1,35
5	20° 34′	0,375	1,87
10	25° 17′	0,472	4,72

Pour les terres les plus compactes, en admettant un poids spécifique de 1800 kilogrammes, une cohésion de 580 kilogrammes par mètre carré superficiel, et $f = 1,4$, les inclinaisons des talus stables correspondantes à diverses hauteurs sont comme suit :

Hauteurs verticales sur lesquelles les terres sont coupées.	Angles d'inclinaison minima des talus sur le plan vertical.	Rapports de la base à la hauteur du talus stable.	Bases des talus correspondantes aux hauteurs verticales.
mètres.			mètres.
de 0 à 4	0	0	0
5	3° 49′	0,0667	0,33
6	6° 44′	0,1178	0,71
7	8° 58′	0,1577	1,10
8	10° 47′	0,1903	1,52
9	12° 78′	0,2178	1,96
10	13° 33′	0,2409	2,41

Lorsque les talus des terres doivent subsister pendant très-longtemps la cohésion est graduellement détruite par les pluies, les gelées, etc., et le talus qui était stable dans l'origine, cesse de l'être. Il faut donc en général négliger la force de cohésion, lorsque les talus doivent subsister pendant un temps très-long, sans être abrités contre les intempéries atmosphériques par un gazonnage ou un revêtement en maçonnerie, et donner au talus une inclinaison telle que le frottement suffise pour maintenir l'équilibre des terres. Mais les excavations ouvertes pour l'exploitation des mines n'étant que temporaires, on peut et l'on doit couper les terres suivant des talus dont la pente varie avec la cohésion. Ils se dégradent bien à la longue, mais par degrés, sans éboulements considérables, et par conséquent sans dangers graves pour les hommes qui travaillent au fond des excavations.

Parois des excavations taillées en banquettes. — On diminue encore ce danger, en coupant les terres, lorsque leur épaisseur est grande, suivant des gradins séparés par des banquettes horizontales qui servent en même temps au passage des voitures et des hommes,

et quelquefois aussi à recueillir les eaux venant de la surface, pour les empêcher d'arriver jusqu'au fond des excavations. Quand les bords sont ainsi taillés en gradins, il n'est pas nécessaire, pour l'équilibre, que les talus supérieurs à toutes les banquettes aient l'inclinaison qu'il faudrait donner au talus des terres, dans le cas où elles seraient coupées suivant une pente uniforme jusqu'au fond de l'excavation. Si l'on agissait ainsi, on serait conduit à enlever un volume de terres trop considérable. Il suffit de donner au talus supérieur à chaque banquette l'inclinaison qui conviendrait aux terres coupées, suivant une pente uniforme jusqu'à la profondeur de cette banquette, et de régler la largeur des banquettes de manière que le volume total des terres enlevées, depuis la surface jusqu'au fond de l'excavation, soit le même que si les terres avaient été coupées suivant une pente uniforme.

L'exemple suivant suffira pour éclaircir ce qui précède. Je suppose qu'on veuille couper les terres en gradins successifs de 3 mètres de hauteur verticale, séparés par des banquettes horizontales. Soient, *fig.* 1, *Pl. XIII*, LM, la surface du sol; A, l'un des bords de l'excavation; AH, la verticale mesurant la profondeur de l'excavation; A*h*, *hh'*, *h'h''*, etc., des distances égales de 3 mètres chacune prises sur cette verticale. Soit AB la ligne de pente du talus qui suffit à la stabilité des terres coupées sur une hauteur verticale de 3 mètres. On creusera d'abord sur la profondeur de 3 mètres, jusqu'au plan horizontal *hx*, en taillant le bord de la tranchée suivant AB. Pour descendre ensuite jusqu'au plan *h'x'*, situé à 6 mètres de profondeur, on mènera par le point A, la ligne A6, représentant la pente du talus qui suffit à la stabilité des terres coupées sur 6 mètres de hauteur. Si on coupait les terres suivant une ligne 6z, en ménageant une banquette de largeur égale à Bz, au niveau *hx*, les conditions de stabilité seraient dépassées; car les terres se soutiendraient suivant la pente continue Az6, quand même on aurait laissé en place le prisme de terre qui a pour base le triangle ABz, prisme qui a été enlevé. On peut donc donner une largeur moindre à la banquette et reculer la ligne de pente 6z, parallèlement à elle-même, en *b*C, le point *b* étant pris au milieu de la distance Bz. En effet, si *b* est pris au milieu de Bz, la ligne C*b* prolongée vers la surface ira couper la ligne AB en *o*, à égale distance des points A et B, et par conséquent les deux triangles B*ob*, A*ou* seront égaux entre eux. Les terres se soutiendraient si elles étaient coupées suivant la pente uniforme indiquée par la ligne *ub*C. Elles se soutiendront de même, étant coupées suivant la ligne brisée C*b*BA, puisque d'une part on enlève le prisme de terre qui a pour base le triangle *bo*B, et que de l'autre on laisse exister le prisme qui a pour

base le triangle égal A$o$$u$. La charge des terres sur l'arête inférieure C de la tranchée est donc la même dans les deux cas, de même que le volume des terres enlevées, et par conséquent les conditions d'équilibre sont également satisfaites. On remarquera que la distance bz, dont la droite εz est reportée en arrière, est égale à la distance horizontale oq du point o milieu de AB, à la ligne d'inclinaison Aε du talus de 6 mètres de hauteur, menée par le point A. Pour s'enfoncer jusqu'au niveau $h'' x''$, on tracera la ligne Aγ, sous l'inclinaison convenable au talus uniforme des terres coupées sur une hauteur de 9 mètres, on reportera la partie $z'\gamma$ de cette ligne, parallèlement à elle-même, en arrière, à une distance cz' égale à bq', et la droite cD sera le profil des terres coupées entre les plans horizontaux $h'x'$, $h''x''$, et Cc, la largeur de la banquette ménagée au niveau $h'x'$. En effet, si l'on prolonge la ligne CD jusqu'à la surface du sol en u', cette ligne ira passer par le point b, puisque l'on a pris $cz' = bq'$. Les deux triangles ubu', Cbc, seront égaux. Les terres se soutiendraient si elles étaient coupées suivant la pente uniforme Dcu'. Elles se soutiendraient par conséquent aussi, si elles étaient coupées suivant la ligne brisée DcCu. Or, nous avons déjà montré qu'on pouvait substituer, sur la hauteur des six premiers mètres, à la coupure suivant Cu, la coupure suivant CbBA; donc enfin, les terres se soutiendront en les coupant suivant la ligne brisée DcCbBA. Pour s'enfoncer au niveau de 12 mètres, jusqu'en Hx'', on mènera par le point A, la droite Aδ, sous l'inclinaison qui convient au talus des terres coupées sur la hauteur totale de 12 mètres. On prendra le milieu o'' de la distance Du'; on mènera l'horizontale $o''q''$ jusqu'à la rencontre de Aδ, et l'on reportera la droite $z''\delta$ en arrière, à une distance $z''d$ égale à $o''q''$. dE représentera le profil des terres coupées entre les niveaux $h''x''$ et Hx''', et dD, la largeur de la banquette horizontale qu'il faudra ménager au niveau $h''x''$. Le profil des terres serait alors suivant la ligne brisée EdDcCbBA. Le volume total des terres enlevées serait le même que si on eût coupé celles-ci suivant la pente continue Edu'', qui convient à la hauteur totale AH. D'une part, la largeur de la tranchée à sa partie supérieure est diminuée, ce qui peut être un avantage; mais, par compensation, on a dû élever une partie des terres d'une profondeur plus grande.

On peut, au surplus, varier d'une infinité de manières le profil brisé EdDcCbBA. Ainsi, on peut reporter la ligne AB en arrière, de façon à élargir le gradin supérieur, en A'B', par exemple, et reporter en avant la ligne cD en c'D', de telle sorte que l'on ait $cc' = $BB'; de cette façon on enlèvera le prisme de terre qui a pour base le parallélogramme AA'BB', dont le poids sera remplacé par le prisme de terre ayant pour

base le parallélogramme $cc'D'D$, équivalent au premier ; ou bien on peut reporter en avant chacune des lignes bC, cD, de la moitié de la distance BB′ mesurée horizontalement. Ces diverses combinaisons feront varier les largeurs des banquettes, en laissant invariables les pentes des talus successifs, et la masse totale des terres à enlever.

Les considérations qui précèdent pourront être mises à profit, lorsque les terres supérieures au gissement auront une assez grande épaisseur et une cohésion médiocre. Il en est ainsi pour quelques dépôts de minerai d'étain d'alluvion, qui se trouvent dans des vallées basses et sont recouverts par des terres sableuses, pour certaines carrières de pierres meulières, situées dans les départements de Seine-et-Marne et de la Marne, etc.

Exemples d'exploitations à ciel ouvert.

Exploitation des couches à peu près horizontales qui affleurent sur les flancs des montagnes. — La forme des excavations dépend surtout, ainsi que nous l'avons indiqué, du relief extérieur du sol et de la forme du gîte. Dans les terrains montueux, lorsque les gîtes à exploiter sont situés au-dessus du niveau des vallées, et affleurent sur les flancs des collines ou des montagnes, l'on attaque sur ces affleurements, en prenant pour sol de l'excavation le mur du gîte. Si celui-ci est horizontal, ou légèrement incliné vers la vallée, les eaux s'écoulent naturellement ; les déblais sont transportés avec facilité au dehors, et rejetés sur la pente de la montagne, en avant de la tranchée. On met d'ailleurs à profit, pour l'abattage des terres, les fissures naturelles des roches, les plans de stratification, et l'on parvient ainsi à faire ébouler à très-peu de frais des masses considérables que l'on n'a plus qu'à trier et à transporter au dehors.

Plusieurs carrières sont ainsi ouvertes, dans le sud du pays de Galles, aux environs de Tredegar et de Merthyr Tydwill, pour l'exploitation simultanée de la houille, du fer carbonaté lithoïde, de l'argile réfractaire et même quelquefois de la chaux carbonatée employée comme castine dans les usines à fer de cette contrée. Celles-ci sont situées tout près de la limite du terrain houiller et de calcaire *carbonifère* inférieur. Les couches de houille, d'une puissanee généralement médiocre, sont faiblement inclinées à l'horizon, et alternent avec des couches d'argile schisteuse, qui sert, comme terre réfractaire, à la confection des briques, avec des bancs de grès stérile, et des assises contenant du fer carbonaté en rognons. Quand ces couches affleurent

Digitized by Google

sur le flanc d'une montagne à pente roide, on commence par attaquer une couche de houille, que l'on exploite souterrainement, sur un front aussi étendu que le comportent les localités. On extrait la totalité de la houille, et l'on soutient provisoirement le toit de l'excavation, soit par des étais en bois, soit par des piliers minces en pierre sèche, soit en ménageant dans la houille même, de distance en distance, quelques piliers *tournés*. Quand on s'est ainsi enfoncé dans la montagne, à une profondeur variable avec la solidité du toit, on enlève en reculant tous les étais placés ou ménagés dans la première période du travail, et l'on provoque ainsi l'éboulement du terrain supérieur, qui se détache habituellement de la masse de la montagne, suivant une déchirure à peu près à pic. On trie, dans l'éboulement, les rognons de fer carbonaté, que l'on met en tas qui restent exposés à l'air, pendant un certain temps, avant d'être conduits aux usines. Les déblais stériles sont rejetés sur le flanc de la montagne, et finissent par former en avant de la carrière, une plate forme sur laquelle on dépose les tas de minerais de fer empilés régulièrement.

Si la couche de houille inférieure repose sur un lit d'agile réfractaire, on exploite celle-ci au pic, en dernier lieu, après avoir enlevé la houille et les déblais. J'ai vu ainsi, près de Tredegar, un escarpement qui avait près de 80 pieds anglais de hauteur verticale.

Exploitation de couches peu inclinées affleurant dans une plaine. — Lorsque les affleurements viennent au jour dans une partie en plaine, on exploite encore à ciel ouvert, jusqu'à une certaine distance, en suivant l'inclinaison très-faible des couches, et remontant les déblais sur cette pente. Ainsi, dans une autre carrière ouverte près de Tredegar, on exploitait une couche de houille d'une puissance d'un mètre environ, recouverte de plusieurs lits de minerais de fer, alternant avec de grès et schistes houillers, sur une épaisseur totale d'environ 4 fathoms ($7^{m},31$). La couche de houille reposait sur un lit d'argile réfractaire. Chaque yard superficiel ($0^{m.\ carré},836$) fournissait à peu près une tonne (100 kilogrammes) de houille, et une tonne et demie (1500 kilogrammes) d'argile réfractaire. On extrayait des massifs supérieurs à la couche de houille, environ 144 chariots de déblais stériles, pour avoir deux chariots de minerai de fer du poids de 900 kilogrammes chacun.

Pour obtenir la houille en gros morceaux, les ouvriers *havaient* dans un lit de schiste tendre, supérieur à la couche de houille. Après avoir enlevé les déblais résultant de l'éboulement, et trié le minerai de fer, ils exploitaient d'abord la houille, puis l'argile réfractaire. Ils travaillaient à l'entreprise, et recevaient:

Digitized by Google

12 schillings (15 fr.) pour 36 quintaux de 112, livres avoir-du-poids (1800 kilogrammes) de minerai de fer, trié et mis en tas sur le bord de la carrière. C'est 8 fr. 33 c. par tonne de 1000 kilogrammes.

On leur payait 2 shillings 6 pence (3 fr. 15 c.) par tonne de houille, et 1 shilling 6 pence (1 fr. 90 c.) par tonne d'argile réfractaire; la houille et l'argile devaient être transportées à l'usine, située à un mille anglais environ (1600 mètres) de la carrière.

En calculant sur cette base qu'un yard carré superficiel fournissait une tonne de houille, une tonne et demie d'argile réfractaire, et un volume de minerai de fer égal à $\frac{1}{72}$ du volume total des déblais, on trouve les résultats suivants:

Le cube du déblai par yard carré superficiel, sur une hauteur de 7m,30, était de 0,836 × 7,30 = 6mèt. cub.,10; ce volume de déblais fournissait $\frac{1}{72}$, c'est-à-dire 0mèt. cub.,084 de minerai de fer, dont le poids devait être, à raison de 2500 kilogrammes au mètre cube, d'environ 210 kilogrammes,

	fr.	c.
Pour lequel les ouvriers recevaient.	1	75
1 tonne de houille était payée.	3	15
1 tonne et demie d'argile réfractaire.	2	75
Total. . . .	7	65
Dont il faut déduire à peu près 50 c. pour le transport de 2 tonnes et demie de matières (houille et argile), à 1600 mètres de distance.	»	50
Reste net. . .	7	15

Pour cette somme, les ouvriers enlevaient et triaient 6m. cubes,10 de déblais de roche, et exploitaient en outre la houille et l'argile découvertes. C'est 1 fr. 17 c. par mètre cube de déblai.

Exploitation à ciel ouvert de couches de houille très-puissantes. — On exploite à Decazeville (Aveyron), pour le service de l'usine à fer, une couche de houille extrêmement puissante, et plissée ou ondulée de manière à former une série alternative de selles et de fonds de bateaux, dont les axes sont légèrement inclinés sur le plan horizontal. Une des selles ou plis convexes de la couche affleure au pied d'une montagne, qui s'abaisse du côté de l'usine, et s'élève ensuite à une hauteur assez grande au-dessus du niveau de la vallée. On a exécuté autrefois des travaux souterrains fort étendus et fort irréguliers, près des affleurements de cette couche, dont la puissance est au moins

de 20 mètres. Les deux pendages et la selle ont même été exploités à une profondeur de 30 à 40 mètres au-dessous du niveau de la galerie d'écoulement, qui débouche dans la petite rivière du Riou-Mort. Comme la selle s'élève dans l'intérieur de la montagne, beaucoup au-dessus du pied de celle-ci, et du niveau d'une ancienne galerie de roulage, on se décida sur mes conseils, en 1838, à attaquer la couche à ciel ouvert, sur le flanc de la montagne; ce travail se poursuit avec succès depuis cette époque; il fournit déjà de la houille au prix de 3 fr. 75 à 4 fr. la tonne au plus; cependant l'épaisseur des terres supérieures à la houille, est au moins égale à la moitié de la puissance de la couche; celle-ci, près des affleurements, dans la partie actuellement exploitée, est traversée par des veines épaisses de schistes stériles; enfin la masse est criblée de vieilles galeries encombrées de déblais, et on peut estimer que plus de la moitié de la houille a été précédemment enlevée.

On peut juger par le résultat déjà obtenu, malgré ces circonstances défavorables, du prix très-modique auquel la houille serait revenue, si la couche eût été exploitée à ciel ouvert, dès l'origine. On continuera de s'enfoncer dans la montagne, jusqu'à ce que l'épaisseur des terres et roches à déblayer soit au moins le double de l'épaisseur de la houille qu'elles recouvrent, et lorsque la tranchée sera suffisamment avancée, on s'enfoncera au-dessous du niveau que l'on a pris pour sol, en enlevant la houille qu'on laisse aujourd'hui sous les pieds, et qui se trouvera découverte. Les deux bords de la tranchée pourront probablement être taillés sous de faibles inclinaisons parce que la tranchée étant poussée suivant l'axe même de la selle, les assises du terrain s'enfoncent des deux côtés, dans l'intérieur de la montagne, et se relèvent vers l'excavation.

Les terres déblayées sont aujourd'hui transportées vers le bas de la vallée, dans des chariots d'une capacité de 2 à 2 1/2 mètres cubes, poussés par des hommes sur des chemins de fer. Les localités favorisent le chargement et le déchargement des chariots, ainsi que l'abattage des terres. Aussi le déblai, avec un transport de 300 ou 400 mètres de distance, ne coûte-t-il pas au delà de 50 centimes par mètre cube.

Il existe dans le centre et le midi de la France, plusieurs couches de houille d'une grande épaisseur et situées à une assez faible profondeur au-dessous de la surface, pour qu'elles puissent s'exploiter à ciel ouvert, sur une partie de leur étendue, plus économiquement que par travaux souterrains. La couche de houille de Commentry (Allier), celle du Breuil à Firminy (Loire), ont été et sont encore exploitées avantageusement de cette manière. La couche de Firmy (Aveyron), dont la puissance est de 10 mètres environ, et qui est généralement

recouverte par 10 à 15 mètres de terres ou de roches d'une faible dureté, n'aurait jamais dû être exploitée autrement.

L'exploitation à ciel ouvert devrait d'ailleurs être appliquée aux couches de houille très-puissantes, quand bien même les frais immédiats seraient un peu plus considérables que ceux d'une exploitation souterraine : car, en travaillant à ciel ouvert, la totalité de la houille est extraite tandis qu'une grande partie resterait enfouie dans les travaux souterrains ; l'on échappe à la nécessité de maintenir ouvertes des galeries souterraines dont l'entretien, peu onéreux d'abord, devient ensuite très-dispendieux ; enfin on n'a point à redouter les incendies spontanés qui se déclarent souvent, dans les travaux souterrains que l'on a laissés s'ébouler, incendies qui rendent inaccessible la partie des travaux voisine des points où ils se manifestent, doivent être combattus par des moyens fort coûteux, entravent toute l'exploitation, et finissent quelquefois par ruiner complètement une mine.

Tout le monde sait que la plupart des carrières de pierres à bâtir, dans les pays de montagnes surtout, sont exploitées à ciel ouvert. La forme des excavations et la manière d'attaquer les roches dépendent de la forme des bancs à exploiter, de la nature et de l'épaisseur des terres ou assises qui les recouvrent. L'on ne peut donner à cet égard aucune règle générale. Je citerai, comme exemple, les exploitations de pierre à plâtre de la butte Montmartre. La couche de pierre à plâtre qu'on a exploitée, à ciel ouvert, sur presque tout le contour de la butte, a une puissance de 16 à 17 mètres. Elle est sensiblement horizontale, et recouverte sur plusieurs points par une épaisseur considérable de terres, marnes et argiles. Les règlements d'administration publique prescrivent aux exploitants, dans l'intérêt des propriétés voisines des carrières, de laisser entre les *fronts de masse*, qui sont taillés à pic, dans la pierre à plâtre, et les limites des propriétés limitrophes, une distance horizontale de 10 mètres, plus un mètre par mètre d'épaisseur des terres de recouvrement. Ainsi, ces terres peuvent s'ébouler en prenant un talus de 45 degrés, un de base sur un de hauteur, sans que les propriétés limitrophes soient atteintes. Cette distance n'a pas été toujours suffisante, par suite de la constitution des terres qui couronnent la butte et recouvrent la masse de pierre exploitée. Il existe, en effet, à une profondeur médiocre, 7 à 8 mètres au-dessous du sol, une couche de glaise sur laquelle coulent les eaux pluviales qui se sont infiltrées à travers les terres supérieures. Cette couche forme le lit de la nappe d'eau qui alimentait les puits de Montmartre, et les sources qui étaient autrefois très-abondantes sur les flancs de la butte. Dans les points où elle a une inclinaison mar-

quée, vers les tranchées ouvertes pour l'exploitation, les terres supérieures ont glissé en masse sur elle, et ces mouvements de terrain se sont souvent étendus bien au delà de la limite prescrite par les règlements.

Dans les pays de plaine et dans le fond des vallées basses, l'exploitation à ciel ouvert est rendue plus difficile, par la nécessité d'épuiser les eaux qui se réunissent au fond des excavations; la fouille et le transport des terres, ainsi que des substances exploitées, sont aussi moins faciles et coûtent plus cher qu'en pays de montagne.

Lorsque les localités s'y prêtent, on ménage le plus souvent, sur un côté de l'excavation, une rampe assez douce pour que les charrettes puissent y descendre. Les autres côtés sont taillés à pic, dans les roches solides, ou bien suivant le talus convenable à la stabilité des terres, ou mieux encore en banquettes. Si le gîte est continu sur une grande étendue, on tâche de l'épuiser d'abord complètement sur un espace assez grand que l'on remblaie ensuite avec les terres provenant de la suite de l'exploitation.

Quant aux eaux, on les réunit dans un puisard que l'on ménage au point le plus bas de l'exploitation, et d'où on les élève au jour au moyen de pompes; quand les parois sont taillées en banquettes, on peut réunir les eaux affluentes aux différents niveaux, dans des puisards creusés sur les banquettes successives, et les empêcher ainsi de tomber au fond de l'excavation.

Si le gîte n'est pas continu sur une grande étendue, et s'il y a plusieurs gîtes semblables, en amas voisins les uns des autres, on remblaie ordinairement une excavation avec les déblais provenant d'une excavation nouvelle faite à proximité. Ces méthodes sont d'ailleurs tellement simples qu'il nous suffira de citer un petit nombre d'exemples. Nous consacrerons un article distinct à l'exploitation des tourbières, qui, par leur importance et les circonstances particulières qu'elles présentent, méritent une mention spéciale.

Ardoisières des environs d'Angers. — Nous devons la description de l'exploitation des ardoisières voisines d'Angers à l'obligeance de M. Le Chatelier.

Les carrières d'ardoises d'Angers s'exploitent à l'est de cette ville, le long de la route de Saumur, sur une série de couches de schiste ardoisier, ayant une puissance totale de 4 à 5000 mètres, dirigée vers l'ouest 20 degrés nord environ. Les principales sont situées dans la commune de Trélazé, à 8 kilomètres d'Angers. On comptait en 1841, 14 carrières, dont la production annuelle s'élevait à 120 millions d'ardoises, représentant une valeur de 2 millions de francs. Les couches de schiste

sont verticales ou inclinées de 75 à 80 degrés au moins sur l'horizon, le pendage est le plus généralement au nord. *fig.* 2, *Pl. XI*, MN. La fissilité se confond avec la stratification, ainsi que le démontrent les empreintes aplaties d'ogygies, que l'on rencontre fréquemment intercalées entre les feuillets d'ardoises. La masse schisteuse est découpée dans tous les sens par plusieurs systèmes de fissures, ou failles, caractérisés chacun par des circonstances particulières. Ces accidents, suivant leur disposition ou leur nature, sont utiles ou nuisibles à l'exploitation ; on distingue 1° les *torsins*, failles dont la puissance est quelquefois de 10 mètres, remplis de schiste broyé, impropre à la fabrication de l'ardoise; les deux parois de ces failles sont ondulées, mais en masse elles sont planes, et présentent une direction oblique à celle des couches d'ardoises qu'elles rejettent ; 2° les *érusses*, fissures dont les parois ne sont pas adhérentes, et qui par suite occasionnent des éboulements M. M... *fig.* 1 *et* 3, *Pl. XI*; 3° les *chauves*, fissures de glissement, ou peut-être joints de stratification, coïncidant avec les plans de fissilité et de stratification MN, *fig.* 2 ; 4° les *chats* (ou *cors de chats*), filons minces de quartz blanc laiteux, réunis quelquefois en faisceaux qui donnent une grande solidité à la masse, mais la rendent inexploitable ; ils sont parallèles à la stratification, ou la coupent sous un angle très-aigu. Ces accidents principaux ont une grande étendue, et se propagent souvent d'une carrière à l'autre. Il existe en outre d'autres systèmes de fissures moins importantes, qui prennent le nom général de *délits*. Toutes les fissures, failles ou filons d'un même système sont parallèles entre eux, et souvent très-rapprochés ; leur étude serait d'une très-grande importance, si la direction de ces exploitations n'était pas abandonnée à des contre-maîtres souvent fort intelligents, mais entièrement dénués de connaissances générales.

Chaque carrière est possédée par une société composée d'un assez petit nombre de membres, qui choisissent parmi eux deux *commissaires* chargés d'administrer et de diriger la carrière. Ils ont sous leurs ordres un *régisseur* dont les appointements sont de 1500 à 1800 fr., qui tient les états de journées et la comptabilité de la carrière, paie les ouvriers, etc. ; un chef des travaux du fond ou *clerc d'à bas*, et un chef des travaux du jour ou *clerc d'à haut*, qui surveille la fabrication. Les appointements des *clercs* ne dépassent pas généralement 1000 à 1200 fr. par an. Les ouvriers sont divisés en deux classes, les *ouvriers d'à bas*, employés à l'abattage de la pierre, et les *ouvriers d'à haut*, qui la débitent et la façonnent en ardoises. Pour établir une carrière, on consulte les anciens *perréieurs* (carriers), on s'en

rapporte à l'analogie, et lorsque le choix d'un emplacement est fait, on commence les travaux sur une vaste échelle; on a rarement eu recours jusqu'ici à des travaux de recherches préliminaires, qui eussent évité souvent de fâcheux mécomptes. Après avoir déblayé la terre végétale et l'argile provenant de la décomposition du schiste, qui présente souvent une épaisseur considérable, *fig.* 3, on attaque le rocher par *foncées* successives ou gradins droits de 3 mètres de hauteur, *fig.* 2 *et* 3, *Pl. XI*, de manière à former une excavation rectangulaire; on coupe verticalement les deux parois perpendiculaires à la direction du schiste auxquelles on donne le nom de *chefs* (chefs du levant, et chef du couchant); sur le chef qui doit présenter le plus de solidité, on établit des cages en charpente destinées à supporter les molettes, et un pont qui vient s'appuyer en arrière sur un mur en pierres sèches, destiné à soutenir les remblais qu'on accumule derrière sur une hauteur assez grande, *fig.* 2 et 3; sur ces remblais sont établis des manéges A, B, C, ou des machines à vapeur. Ces charpentes, assez grossièrement établies, ne présentent pas toujours une solidité suffisante: la charpente du manége A, *fig.* 2, s'est écroulée en 1842, a entraîné un cheval dans sa chute, et tué et blessé plusieurs ouvriers au fond de la carrière. Chaque foncée est commencée au milieu de la carrière, et creusée avec la *pointe* représentée *fig.* 13; elle est ouverte ainsi sur une largeur d'un mètre, et se termine en coin, *fig.* 2; on abat ensuite le rocher de part et d'autre, de telle manière que la carrière présente toujours plusieurs gradins, sur chacun desquels on peut disposer un atelier. Pour abattre les bancs, on pratique suivant le fil de la pierre, au moyen de la pointe, une série d'entailles dans chacune desquelles on place un coin ou *quille*; on dispose ainsi jusqu'à 20 ou 25 coins sur une longueur de 8 à 10 mètres, et des ouvriers en nombre égal à celui des coins, se placent sur une seule ligne armés d'un gros pic ou marteau pesant, avec lequel ils frappent en cadence sur la tête des coins. Le rocher se fend, et les coins se noient dans la fente; on met alors un nouveau rang de coins, et on en superpose ainsi jusqu'à 5 ou 6. Le rocher se brise par le pied, et finit par se renverser; si l'inclinaison du schiste est telle qu'il ne puisse pas tomber par son propre poids, on place dans la fente des barres de fer ou *béquilles fig.* 8. assujetties à un manche en bois, de telle sorte que l'une des extrémités portant sur la pièce à renverser, l'autre s'appuie sur l'extrémité d'un levier nommé *houlette*, *fig.* 6, sur lequel dix à quinze hommes font une pesée, au moyen d'une corde attachée à son extrémité supérieure. La longueur du bloc que l'on abat au moyen de coins, ou que l'on *enferre*, est déterminée par la position

des fissures ou *délits* naturels; son épaisseur maximum est d'un mètre. Pour faciliter l'abattage des bancs au droit des chefs, on fait une *tranche* dont le prolongement donne au chef la régularité que l'on peut remarquer dans les *fig.* 1 et 3. Les raies horizontales de la *fig.* 2, figurent la trace de chaque gradin ou foncée sur le chef. Depuis quelque temps on emploie avec avantage la mine pour faciliter l'abattage; pour cela lorsqu'un banc est enferré, et que l'action des coins a déterminé une large fente, on dispose à son pied deux ou trois coups de mine, et on les fait partir ensemble; ils déterminent la cassure du rocher à la partie inférieure du gradin. Les bancs ne se brisent jamais d'une manière nette par le pied, il reste des débris de rocher saillants, qui portent le nom d'*écots*, que l'on abat ou *range* au moyen de la pointe.

Lorsqu'un banc est abattu, on le divise au moyen du *fer*, *fig.* 16, et de l'*alésoir*, *fig.* 19 et 18, que l'on chasse entre les plans de fissilité au moyen du *pic*, *fig.* 10, ou de la pointe qui sert alors de marteau. Chacune de ces plaques est divisée en fragments assez petits, pour qu'on puisse les manier, au moyen du *pic* et d'un outil particulier nommé *carnoir*, *fig.* 15. Ces fragments sont chargés dans les *bassicots*, *fig.* 4, 5 et 6, et enlevés à la surface. Au commencement de l'exploitation, on reçoit les bassicots au pied du chef, sur un chariot porté par un petit chemin de fer, et on les mène aux différents points de la carrière; lorsque l'excavation est assez profonde, on les guide, au moyen de câbles ou *billons* tendus en travers de la carrière, de manière à les faire arriver naturellement aux différents points de chargement. Les molettes sont placées à l'extrémité d'une saillie qui termine le pont, et celui-ci présente une ouverture ou lumière assez grande pour laisser passer le bassicot, mais plus petite que la voie des charrettes employées au transport. Lorsque le bassicot est élevé au-dessus du pont, on accule la charrette qui vient couvrir la lumière, et on laisse redescendre le bassicot qui est porté directement aux chantiers de fabrication, disposés autour de la carrière sur les tas de remblais. Quelquefois on remplace cette disposition par un chariot roulant, sur lequel vient s'acculer la charrette, et que le recul du cheval pousse au-dessous du bassicot.

Ainsi qu'on l'a vu plus haut, les chefs sont toujours taillés verticalement; les parois latérales sont taillées en gradins plus ou moins larges, suivant la solidité du rocher ardoisier; dans beaucoup de carrières la paroi du sud est formée par une chauve. On abandonne la carrière lorsque les parties supérieures, fatiguées par les filtrations d'eau, donnent lieu à des éboulements trop fréquents, ou lorsque la

carrière est devenue trop étroite pour que l'exploitation soit profitable. La profondeur atteint souvent 100 mètres; on a vu, il y a quelques années, une carrière finir à la profondeur de 140 mètres. On a essayé avec succès récemment, pour éviter l'enlèvement d'une épaisseur considérable de rocher stérile à la surface et le déplacement de trois machines à vapeur, d'exploiter souterrainement; cette exploitation présente sur une échelle moins grande, la même disposition qu'une carrière à ciel ouvert; elle forme une immense excavation de 40 mètres de long, 25 mètres de large et 30 mètres de profondeur, recouverte d'une voûte presque plate de 30 mètres d'épaisseur à la clef; elle est éclairée au gaz.

L'ardoise est façonnée en plein air, sur les tas de remblais qui entourent la carrière; les ouvriers se mettent à l'abri du vent et de la pluie, au moyen d'un cadre garni de paille, qui porte le nom de *tue-vent* et qu'ils orientent suivant la direction du vent. Un chantier se compose ordinairement de trois hommes, deux ouvriers fendeurs et un apprenti; ils se partagent les différentes parties de l'opération. La première consiste à débiter les blocs extraits de la carrière en *répartons* ou pièces de 2 à 3 centimètres d'épaisseur, et présentant grossièrement la forme et les dimensions des ardoises de diverses espèces; l'ouvrier se sert pour cela du gros ciseau, *fig.* 20, et d'un maillet en bois; il tient la pièce d'ardoise à débiter entre ses jambes. Pour subdiviser le réparton en ardoises, l'ouvrier le place entre ses pieds armés de gros sabots et ses jambes enveloppées d'un matelas de chiffons, et sur une cassure bien fraîche il appuie le tranchant d'un ciseau plat très-mince, appelé *dougé*, *fig.* 17, en le disposant suivant le fil de la pierre accusé par des stries très-nettes; il frappe légèrement avec un petit maillet et détermine une fente qu'il agrandit en y promenant le ciseau. Avec de l'habitude, les ouvriers débitent les répartons en feuilles si minces, qu'on est obligé de les mettre à l'amende pour les empêcher de faire foisonner la pierre outre mesure. L'ardoise débitée en feuilles, est ensuite taillée sur un billot en bois, nommé le *chaput*, *fig.* 14, armé sur le bord d'une lame de fer qui forme l'arête; l'ouvrier place l'ardoise à plat sur le chaput, et avec le *doleau*, sorte de couperet armé d'un manche en bois, *fig.* 12, il la coupe au ras de l'arête; au moyen des entailles que porte le doleau, il jauge les ardoises qu'il coupe et les amène promptement à la dimension voulue; les ouvriers exercés arrivent sans tâtonnement à ce résultat.

On fabrique dans l'Anjou, neuf espèces d'ardoises, différentes par leurs dimensions.

1° La première carrée.	livrées au commerce extérieur.	
2° — deuxième carrée.		
3° — troisième carrée.	de petite dimension, rarement employées.	
4° — quatrième carrée.		
5° Poil taché.	ardoises communes, employées uniquement dans le pays.	
6° Poil roux.		
7° Héridelle.	ardoise très-allongée.	espèces assez rarement fabriquées.
8° Cofine	ardoise à surface courbe.	
9° Écaille.	ardoise arrondie.	

La première carrée se vend, sur le port d'Angers, 25 fr. le mille (1040), et le poil taché, 15 fr.

Carrières de Meules des départements de Seine-et-Marne, et de la Marne. — (1) Les meules de La Ferté-sous-Jouarre, Montmirail et Épernay, ne sont ordinairement recouvertes que par 3 à 4 mètres de sables ou argiles au-dessous desquels elles se trouvent en bancs horizontaux. Néanmoins, aux carrières de Tarterel, près La Ferté, elles sont recouvertes par 12 à 18 mètres de sable. Dans cette dernière localité, on s'assure, avant de faire une fouille, de l'existence des meulières, qui ne forment point des bancs continus, mais des masses plus ou moins étendues au milieu de sables ou d'argiles ocreuses. Pour cela on fait plusieurs sondages préalables au moyen d'une simple barre de fer terminée en pointe que l'on enfonce dans les sables en frappant sur sa tête avec un maillet. Quand on est arrivé à une profondeur de 20 mètres sans trouver de meulière, on renonce à des recherches sur ce point. Quand on trouve de la meulière, on fait dans le voisinage deux ou trois nouveaux trous, et lorsqu'on est assuré de la continuité de la masse, on procède à l'enlèvement des sables qui la recouvrent : à cet effet, on donne aux parois de l'excavation la forme de banquettes dont chacune a 6 mètres de hauteur, et le talus nécessaire pour prévenir les éboulements. Les déblais sont transportés dans l'excavation la plus voisine qui a été abandonnée. Sur chaque banquette on pratique une rigole qui conduit les eaux à une des extrémités où elle est reprise par une pompe ou tout autre mécanisme qui l'élève sur la banquette supérieure. Arrivé à la roche, l'ouvrier tâte la roche et trace sur une partie qui n'a point de défauts, une cir-

(1) Les détails suivants sur l'exploitation des meules sont empruntés à un Mémoire de M. Dufrénoy.

Digitized by Google

conférence dont le rayon est égal à celui de la meule. Il pratique ensuite au pic une entaille circulaire dont la profondeur verticale est égale à l'épaisseur que la meule doit avoir. Le pourtour vertical du cylindre étant ainsi dégagé, il reste à le détacher de sa base. A cet effet, on pratique tout autour de celle-ci une rainure de $0^m,45$ à $0^m,50$ de profondeur, comprise dans un plan horizontal. On enfonce dans cette rainure, sur plusieurs points du contour à peu près équidistants, des couples de coins appuyés l'un contre l'autre entre lesquels on en insinue un troisième qui est plus long. On frappe ensuite en tournant sur les têtes de tous les coins du milieu, avec précaution, et on détache ainsi la meule de sa base.

La meule détachée est retirée de l'excavation. Pour cela, on a pratiqué sur un des côtés de celle-ci, une rampe ou plan incliné, sur lequel on fait monter la meule, en la posant sur des rouleaux, et la tirant à l'aide de câbles et d'un treuil, ou simplement à bras d'hommes.

Toutes les meules ne sont pas d'un seul bloc ; le plus grand nombre d'entre elles sont composées de plusieurs carreaux convenablement taillés et réunis par un cercle en fer, avec plâtre coulé dans les joints des carreaux.

	fr.	c.
Le prix payé à l'ouvrier pour une meule entière ébauchée, ayant 6 pieds de diamètre et 14 pouces d'épaisseur, est de.	150	»

Les autres dépenses sont :

Droit au propriétaire du sol, de 15 à 30 fr.	23	»
Rachevage des meules entières.	18	»
Frais d'outils pour le rachevage.	6	»
Prix total de la meule finie sur place. . . .	197	»

A Montmirail on estime comme suit les dépenses d'extraction :

	fr.	c.
Enlèvement des déblais qui couvrent la pierre, 15 jours à 2 fr. 50 c.	37	50
Coupe de la meule, 15 jours à 3 fr..	45	»
Frais d'outils pour la coupe.	25	»
Extraction de la meule.	10	»
Droit au propriétaire du sol.	20	»
Rachevage des meules, 8 jours à 3 fr.	24	»
Outils pour le rachevage.	15	»
Marque, plâtrage, perçage de l'œil.	10	»
	186	50

Quant aux carreaux, ils ont ordinairement de 14 à 16 pouces de loug, sur 8 à 9 de large et 6 à 7 d'épais. Il en entre de 36 à 40 dans la composition d'une meule.

Exploitation des mines en sacs.— Les mines de fer en grains se trouvent souvent très-près de la surface du sol, soit en couches assez régulières, soit remplissant des cavités de forme irrégulière existantes à la surface du calcaire inférieur à la terre végétale. Dans le Berry et le Nivernais, ces minerais sont exploitées à ciel ouvert. Après s'être assuré de l'existence du minerai, on enlève les terres que l'on transporte dans une excavation voisine : puis l'on extrait le minerai de fer en donnant aux parois de l'excavation la forme de banquettes ou gradins. La pelle et la pioche suffisent ordinairement à ce travail.

Les eaux gênent peu pendant l'été, parce qu'elles s'écoulent en partie par les fissures du calcaire inférieur, et c'est surtout pendant cette saison qu'on se livre à l'exploitation des minerais qui sont lavés pendant la saison pluvieuse. A cet effet, les minerais à laver sont transportés près d'une ancienne excavation remplie d'eau. On élève, au moyen d'nne pelle, ou d'un seau à bascule, l'eau nécessaire au lavage, qui rentre ensuite dans la fosse en entraînant le limon dont elle s'est chargée et qui sert en partie à recombler l'excavation.

Les mines de fer en grains de Poisson (Haute-Marne) ont été exploitées à ciel ouvert jusqu'à 50 mètres de profondeur : elles sont situées dans une montagne calcaire à assises horizontales. Les parois de l'excavation sont très-solides, quoique coupées à pic, et les eaux trouvent un écoulement naturel dans les fissures du terrain.

Exploitation des minerais d'étain d'alluvion. — Des exploitations d'étain d'alluvion sont ouvertes dans plusieurs vallées du comté de Cornwall, ainsi que dans les vallées des montagnes de la Saxe qui renferment des filons d'étain.

Dans le comté de Cornwall, les *streamworks* les plus importants sont situés dans une vallée qui débouche dans la mer au port de Pentowan, près Saint-Austle. Le fond de cette vallée renferme des couches d'alluvion formées principalement de sable et d'argile, lesquelles reposent sur le killas ou la grauwacke qui constitue les montagnes voisines. Les parties inférieures de ce dépôt renferment des galets d'étain oxydé pur, et d'autres galets contenant de l'étain oxydé disséminé. Dans un de ces streamworks que j'ai eu occasion de visiter, l'épaisseur du dépôt d'alluvion est de 5 à 6 fathoms, 30 à 36 pieds anglais. La couche de sable contenant les galets stanifères, qui a 4 à 5 pieds d'épaisseur, est à la partie inférieure du dépôt ; les couches supérieures ne contiennent point du tout de minerai.

AR, *fig* 3, *Pl. XIII*, est le cours d'eau qui a été détourné sur un des côtés de la vallée et endigué avec soin. BCDE est l'excavation; trois côtés sont taillés en gradins ou banquettes qui ont 1 1/2 à 2 pieds de hauteur : le quatrième côté est formé par le talus naturel des déblais qui remplissent l'excavation provenant de l'exploitation antérieure.

Au milieu de ces déblais, on a ménagé un puits P au fond duquel est un puisard où se ramassent les eaux qui découlent le long des parois de l'excavation, lesquelles servent d'abord au lavage des minerais, et sont ensuite conduites au puisard par un aqueduc en pierres sèches ménagé sous les remblais. Ces eaux sont extraites du puisard P par des pompes mises en jeu par une roue à augets qui reçoit les eaux du cours d'eau AR.

Le déblaiement se continue en remontant le cours d'eau, en même temps qu'on exploite au fond de l'excavation le sable stannifère. Les déblais sont conduits à la brouette de l'extrémité BE de l'excavation à l'extrémité CD où on les jette. Les brouettes peuvent circuler sur les banquettes ménagées sur les faces latérales qui sont à cet effet couvertes de planches. On a ménagé sur les banquettes des rigoles qui reçoivent les eaux découlant des parois de l'excavation, préviennent la dégradation des banquettes, et conduisent ces eaux au fond de l'excavation, où elles tombent à la tête d'une large caisse en bois ouverte à la partie postérieure, et dans laquelle on jette les sables stannifères. On délaie ceux-ci dans le courant d'eau qui entraîne les matières stériles, et laisse les morceaux d'étain oxydé. Les eaux entraînent les sables stériles, et les déposent dans des bassins qu'elles traversent, avant d'entrer dans l'aqueduc qui les conduit au puisard. Les morceaux restés dans la caisse sont triés en morceaux massifs, et morceaux qui doivent être bocardés et lavés de nouveau. On extrait les uns et les autres séparément du fond de l'excavation. A mesure que l'exploitation remonte la vallée, on continue l'aqueduc qui est sous les déblais, et qui conduit au puisard les eaux qui ont servi au lavage. On emploie à construire les murs de cet aqueduc les plus gros galets stériles qui se trouvent dans les couches inférieures du dépôt.

Les terres déblayées sont conduites à la brouette à une distance de 150 fathoms environ. Il faut 130 brouettes à peu près pour contenir 1 fathom cube, ou (en mesures françaises) 21 brouettes pour contenir 1 mètre cube massif.

Quelques-uns des anciens *seyffenwerks* de la Saxe et de la Bohême étaient situés sur le penchant de collines à pente peu considérable. On

n'avait pas alors besoin d'épuiser les eaux qui servaient au lavage des minerais, et qui s'écoulaient naturellement à la partie inférieure de la fosse.

Exploitation de la tourbe.

Origine des tourbes. — Les tourbes sont des dépôts de combustibles recouverts par des terrains de formation tout à fait récente, et le plus souvent par des assises d'une petite épaisseur de sables, de cailloux roulés et de terre végétale. La tourbe provient de la décomposition des végétaux et principalement, à ce qu'il paraît, des plantes herbacées aquatiques et des feuilles d'arbres. On a trouvé, dans certaines tourbières, des troncs d'arbres entiers du même genre que ceux qui croissent actuellement dans la contrée où elles existent, ce qui prouve que la nature du climat n'a pas changé sensiblement, depuis l'époque de la formation des dépôts tourbeux. On y a trouvé aussi des instruments d'agriculture, des médailles, qui prouvent leur origine récente. Enfin il se forme encore de nos jours, dans certaines vallées marécageuses, aux dépens des plantes aquatiques qui y végètent, une espèce particulière de tourbe de qualité inférieure. C'est ce qui a lieu dans la vallée de la Somme, depuis le canal Crozat jusques à Amiens, où cette tourbe qui sert au chauffage des habitants, porte le nom de *bouzin*.

Situations des dépôts tourbeux. — Les dépôts de tourbes se trouvent dans les vallées des rivières qui ont une faible pente, telles que celles des départements du Pas-de-Calais et de la Somme, les vallées de l'Essone et de la Juine (Seine et Oise), la vallée de la Loire près de son embouchure, les plaines de la Hollande. On en rencontre aussi à une grande hauteur sur des plateaux de montagnes qui sont aujourd'hui dépourvus d'arbres, et en général sur la ligne de partage des eaux entre deux bassins de rivières; telles sont les tourbières du Champ-du-Feu, du Valtin, etc., dans les Vosges, celles du Dartmoor-Forest (Devonshire), et du comté de Monmouth, de Durheim et Schwenningen, près des sources du Necker, et sur la ligne de partage des eaux entre cette rivière et le Danube, du Fichtelgebirge en Bavière, etc.

Qualités diverses de la tourbe. — Les bancs de tourbes sont quelquefois d'une épaisseur considérable. Le plus souvent alors la qualité de la tourbe varie avec la profondeur à laquelle elle est située. Ainsi, dans les vallées de l'Essone et de la Juine, où la tourbe n'est guère recouverte que par 0m,65 de terre végétale au plus, et où l'épaisseur de la tourbe varie en général de 2 à 5 mètres, le premier mètre est

de la tourbe légère, spongieuse, entremêlée de tiges de roseaux, de joncs et de filaments végétaux; au-dessous, et jusqu'à $1^m,50$ ou 2 mètres de profondeur, on trouve de la tourbe plus serrée, plus pesante et plus noire que la précédente, mais encore fortement entrelacée de fibres de végétaux, quoiqu'elle renferme peu de roseaux et de joncs. Plus profondément, les vestiges végétaux disparaissent, et la tourbe est noire et compacte. En général on peut distinguer les tourbes en trois classes : la tourbe mousseuse analogue au *bouzin* de la vallée de la Haute-Somme; la tourbe moyenne, plus compacte que la précédente, mais moins que la variété qui suit, de couleur brun clair, renfermant des vestiges de végétaux reconnaissables, en plus ou moins grande quantité; la tourbe noire et compacte qui se trouve ordinairement à une plus grande profondeur, et à la partie tout à fait inférieure du dépôt.

Indices de l'existence des dépôts tourbeux. — L'existence de la tourbe est généralement indiquée par la nature tremblante du sol qui la recèle. On reconnaît d'ailleurs l'épaisseur des bancs au moyen de la sonde du tourbier que nous avons déjà mentionnée. C'est une simple tarière demi-ouverte d'un diamètre de 6 à 8 centimètres, fixée à un manche de 5 à 6 mètres de longueur, sur lequel sont marquées des divisions de 30 en 30 centimètres : on l'enfonce dans le banc tourbeux de 30 centimètres à la fois; on la tourne ensuite dans le trou de manière à ce que la tarière se remplisse, et l'on retire une *carotte* qui fait connaître la nature de la tourbe : on replace la sonde dans le même trou, on l'enfonce encore de 30 centimètres, on retire une seconde carotte, et on reconnaît ainsi le banc entier, par couches successives de 30 centimètres de hauteur. Cette hauteur est celle des prismes de tourbe que l'on exploite et auxquels on donne le nom de *pointes*.

Divers modes d'exploitation. — La tourbe est toujours assez tendre pour pouvoir se couper facilement à l'aide d'un instrument tranchant : elle peut être coupée à pic sur une assez grande hauteur, sans qu'on ait à craindre d'éboulement à cause de la ténacité de la masse due à la présence des filandres végétales qui la traversent en tout sens, pourvu que l'on évite de charger le sol sur les bords des entailles, ce qui déterminerait le gonflement et ensuite l'éboulement des tourbes, à cause de leur mollesse; aussi faut-il avoir soin de ne pas déposer sur les bords des entailles les terres qu'on a enlevées, pour mettre à découvert les bancs de tourbes.

Les dépôts de tourbe s'étant formés au sein d'eaux stagnantes dans des dépressions naturelles du sol, il arrivera assez rarement qu'il soit possible d'ouvrir, sans trop de frais, des rigoles par lesquelles les

eaux de l'excavation puissent s'écouler de manière à laisser à sec le sol sur lequel le banc de tourbe repose. Si ces rigoles ou petites galeries d'écoulement peuvent être exécutées, l'extraction de la tourbe se fera sans difficulté au moyen de l'instrument appelé louchet à aileron. Le même mode d'exploitation est encore suivi lorsque les eaux affluentes dans les excavations, au-dessous du niveau des rigoles d'épuisement, sont en assez petite quantité pour qu'on puisse, avec une faible dépense, suppléer, par leur épuisement au moyen de sceaux à bascule, de petites pompes en bois, de vis d'Archimède ou autres machines analogues, au défaut d'écoulement naturel. Mais si les eaux affluentes sont en quantité considérable, ce qui arrive souvent, on renonce à les épuiser, et l'on exploite la tourbe sous l'eau, au moyen d'instruments convenables pour cela, et qui sont différents, suivant la profondeur de l'eau et le degré de consistance de la tourbe.

Extraction des tourbes à sec. — L'exploitation de la tourbe, dans le cas où l'entaille est asséchée par une rigole d'écoulement ou des machines d'épuisement, ne présente aucune difficulté. On trace d'abord à la surface du sol les limites de l'entaille que l'on veut faire. Les dimensions de celle-ci doivent être réglées de manière que l'ouvrier qui extrait la tourbe au louchet, puisse facilement jeter à un homme qui se tient sur le bord, les mottes de tourbe que celui-ci doit porter sur le pré, où elles doivent être séchées; il faut pour cela que la largeur de la fosse n'excède pas 3 mètres. Sa longueur peut d'ailleurs être quelconque, de sorte qu'elle a ordinairement la forme d'un fossé de 3 mètres de large. Dans la vallée de la Somme; on a l'habitude d'ouvrir de petites fosses carrées qui n'ont que 3 mètres de côté. On met la tourbe à découvert dans l'enceinte de ce carré: la terre enlevée qui est ordinairement de bonne nature, est mise de côté, pour être portée ultérieurement sur des terrains qui seront ainsi amendés et bonifiés. La tourbe étant découverte, on creuse avec une bêche ordinaire, à l'un des angles A du carré, *fig. a*, *Pl. XII*, une entaille prismatique, de 30 centimètres de profondeur; deux ouvriers attaquent la tourbe, l'un sur la ligne *ab*, l'autre sur la ligne *a'b*, en marchant le premier de *a* vers *b*, l'autre de *a'* vers *b*. Ils se servent pour cela, du *louchet à aileron*, *fig.* 20, *Pl. IX*, c'est une bêche armée d'un aileron dont le plan forme un angle légèrement obtus avec celui du fer; le fer a 30 centimètres de long, et 8 centimètres de large; l'aileron a également 8 centimètres. Le louchet du tourbier coupe ainsi sur deux faces, et chaque ouvrier détache successivement une file de prismes de tourbe de 30 centimètres de haut, qui ne tiennent plus que par leur base, lorsqu'ils ont été coupés par le louchet. Ils se laissent facilement détacher de leur

base, et le *tireur* les jette à mesure à un autre ouvrier placé sur les bords de l'entaille, qui les reçoit et les range dans une brouette destinée à les transporter. Quand les ouvriers se rencontrent vers l'angle *b* du carré, un seul achève l'enlèvement de cette rangée de tourbe, et l'autre va reprendre une autre file.

On exploite ainsi le banc de tourbe à la surface, sur une hauteur d'une pointe. Quand on est pressé, plusieurs tireurs peuvent travailler dans la même entaille, et la tourbe est alors exploitée par banquette ou gradins. Ainsi, quand la première pointe est enlevée sur une étendue suffisante, deux autres tireurs peuvent commencer l'enlèvement d'une deuxième pointe, et ainsi de suite.

Le tireur peut jeter les tourbes à l'ouvrier chargé de les recevoir sur les bords de l'entaille, d'une profondeur de 10 à 12 pointes, 3 mètres à $3^{m},60$. A une profondeur plus grande, il faut placer un ouvrier intermédiaire qui les reçoit du tireur et les jette à la surface.

Les eaux doivent toujours être épuisées au niveau de la banquette la plus basse sur lequel se tiennent les ouvriers, et quand il en arrive en quantité notable, il importe de placer beaucoup d'ouvriers à la fois, pour hâter l'opération.

Cette première entaille étant ainsi tourbée jusqu'au sol du banc ou du moins jusqu'à la profondeur à laquelle on peut atteindre, sans trop augmenter les dépenses d'épuisement, on en ouvre une seconde contiguë à la première, à moins que l'on ne craigne d'amener par là une trop grande affluence d'eaux, auquel cas il arrive souvent que la seconde entaille, en tout semblable à la première, est tenue isolée de celle-ci. Cette méthode a l'inconvénient de laisser perdre une grande quantité de tourbe.

Extraction de la tourbe sous l'eau, au grand louchet. — Lorsque l'affluence d'eaux est trop considérable pour qu'on puisse continuer au louchet l'extraction de la tourbe jusqu'au sol qui la supporte, on peut achever l'extraction sous l'eau, au moyen d'un instrument appelé ***grand louchet***, représenté *fig.* 21, *Pl. IX*. Il diffère du petit louchet, en ce qu'il est tranchant sur trois côtés et qu'il a la longueur de trois à quatre tourbes. Pour qu'il ne soit pas trop lourd, le fer n'en est pas plus long que celui du petit louchet. Il est accompagné de deux ailerons, un de chaque côté, dont les plans sont perpendiculaires à celui du fer. Au-dessus du fer et des ailerons est un grillage en fer mince, formé par deux bandes verticales liées aux ailerons, près de leurs extrémités, par des rivets, et des bandes ou plutôt des doubles équerres horizontales équidistantes qui se lient aux premières, et au manche de l'instrument (*Journal des mines*, vol. XXXII,

p. 260, et *Bulletin de la soc. d'encouragement*, n° 36, p. 329; n° 74, p. 201, août 1810, et n° 88, p. 272, octobre 1811). Cet instrument est muni d'un très-long manche qui permet d'aller puiser les tourbes à une profondeur de 25 à 26 pointes sous l'eau.

Pour extraire au grand louchet, il faut que l'ouvrier puisse voir la partie supérieure du banc dans lequel il enfonce son outil bien verticalement de la longueur de l'instrument; à cet effet, le manche de celui-ci porte des marques équidistantes et dont l'intervalle est égal à la longueur des prismes que l'on enlève à la fois. On remet l'instrument plusieurs fois de suite dans le même trou, jusqu'à ce qu'on soit arrivé au sol du banc.

Pour commencer le travail, il faudra pratiquer une première entaille sur toute la profondeur du banc, afin de dégager la masse de tourbe sur une face. Cette entaille serait, je pense, très-facile à faire au moyen d'une grande tarière de sonde de 50 à 60 centimètres de diamètre, au moyen de laquelle on forerait avec facilité dans le banc, un trou circulaire que l'on rendrait ensuite carré à l'aide du grand louchet.

Le tirage au grand louchet exige de l'adresse et de la force. Cependant, l'ouvrier n'éprouve de fatigue, pour soulever le long prisme de tourbe, qu'au moment où son instrument sort de l'eau; il doit avoir soin de l'incliner en le soulevant de manière que le parallélipipède de tourbe soit contenu dans le châssis; il le passe à un ouvrier qui le reçoit à la main et le divise en trois ou quatre morceaux ayant chacun la longueur d'une pointe.

On a proposé également d'employer un autre instrument, consistant en une caisse ou boîte à jour, fixée au bout d'un long manche, fermée et tranchante sur trois faces; sur la quatrième face est aussi une lame tranchante mobile dans deux coulisses verticales, et que l'on abaisse lorsqu'on a enfoncé l'instrument dans la tourbe. On donne à la caisse la longueur de deux tourbes et aussi la largeur de deux tourbes, de sorte que l'on retire 4 pointes à la fois, comme avec le grand louchet (*Journal des mines*, vol. XXXII, p. 261.)

M. Gillet de Laumont rapporte que, dans la vallée de l'Esonne, où l'on a fait usage des trois genres de louchets que nous venons de faire connaître, un ouvrier tirait au petit louchet 32 pointes de tourbe par minute, et qu'il en tirait seulement 16, dans le même temps, au moyen du grand louchet ou de la caisse à 4 tranchants. L'avantage de ne pas être obligé d'épuiser les eaux peut compenser, dans certaines circonstances, le désavantage du grand louchet sur le petit, eu égard à la rapidité de l'extraction.

La meilleure marche à suivre pour exploiter les dépôts de tourbes existants dans des vallées, consiste à les exploiter par tranchées ou fossés longitudinaux de 3 à 4 mètres de large, ouverts à partir du bas de la vallée, et à enlever la tourbe en remontant. Les premières entailles faites à la partie basse de la vallée servent de puisard pour recevoir les eaux des entailles suivantes : quand une première tranchée est épuisée, on en ouvre une autre parallèle, immédiatement à côté, ou du moins le plus près possible de la première.

Étendage et séchage des tourbes. — Les tourbes extraites doivent être séchées avant qu'on puisse en faire usage ; pour cela, il faut qu'elles soient exposées sur toutes leurs faces à l'action de l'air et du soleil : cela exige que l'extraction des tourbes soit commencée au printemps et faite avec rapidité, de manière que la dessiccation soit terminée avec le mois de septembre ou d'octobre. Dans les pays de hautes montagnes, tels que les Vosges et les Alpes, la saison sèche a une durée moindre, et le séchage des tourbes est par là rendu plus difficile.

L'ouvrier qui reçoit les tourbes des mains du tireur les pose avec soin dans une brouette placée à côté de lui, et conduit la brouette, quand elle est remplie, au lieu de l'étente ; la brouettée est habituellement de 15 tourbes : il ne faut pas en mettre plus, de crainte qu'elles ne se brisent.

On choisit, pour étendre les tourbes, une place sèche, plane et rapprochée de l'entaille ; la surface de l'étente doit être suffisante, et l'on compte qu'il faut une surface d'un hectare pour étendre les tourbes extraites dans une surface égale sur la hauteur d'une pointe ; en d'autres termes, que la surface de l'étente est égale à celle de l'entaille, multipliée par le nombre de pointes qu'on extrait sur une même verticale.

Le contenu de chaque brouette est mis sur la place d'étente en un petit tas contenant 15 tourbes, appelé *pilet* ou *rentelet.* Ces petits tas sont séparés l'un de l'autre par une distance d'une demi-semelle, pour que l'air puisse librement circuler tout alentour.

Quand les tourbes, mises ainsi en petit tas, sont couennées, c'est-à-dire, lorsque la surface a acquis une consistance assez forte, on reprend les tourbes pour les mettre en tas de 21. Dans la construction de ces nouveaux tas appelés *cantelets* ou *catelets*, on a soin de placer au-dessous les tourbes qui étaient dessus dans les pilets, et réciproquement. Les cantelets sont plus distants l'un de l'autre, et les tourbes sont posées de façon à laisser entre elles de grands vides pour la circulation de l'air.

La tourbe des cantelets étant bien couennée, on la met en *lanternes*, en *monts* ou en *haies*, pour terminer la dessiccation.

On appelle lanternes des tas coniques. Le cercle extérieur de la base est formé de 7 à 12 tourbes, placées circulairement à côté les unes des autres, sur lesquelles on élève en retraite d'autres rangées circulaires de tourbes, en remplissant le vide intérieur avec des tourbes bien sèches : la lanterne se termine au sommet par une seule tourbe.

On appelle monts des tas allongés de 0m,65 de large et 0m,80 de haut. Les faces latérales sont inclinées, et le centre du tas est aussi rempli de tourbes sèches.

Les haies se forment en posant sur le sol une double rangée des tourbes les plus sèches, debout et adossées l'une contre l'autre; sur cette base, on élève ensuite une muraille de tourbes couchées qui n'a que l'épaisseur d'une tourbe, et qu'on monte à 0m,65 ou 1 mètre de hauteur. Pour que cette muraille puisse se soutenir, malgré son peu d'épaisseur, on la dispose en zig-zag.

La dessiccation étant poussée assez loin, on procède à l'empilage des tourbes. Il est essentiel d'empiler à propos; si l'on empile trop tôt, la tourbe humide ne se dessèche jamais complètement : elle s'échauffe, et l'on est obligé, dans tous les cas, de désempiler au printemps suivant, et d'étendre de nouveau. Si l'on empile trop tard, la tourbe s'est déjà brisée par une dessiccation trop prolongée; elle se brise et éprouve un déchet considérable.

La tourbe, suivant sa nature, doit être empilée plus tôt ou plus tard. Ainsi, pour celle qui est entremêlée de beaucoup de filandres et de débris de végétaux, on n'a point à craindre une dessiccation poussée trop loin ; celle au contraire qui est compacte et homogène, est plus sujette à se fendre, à tomber en débris, et doit être empilée verte plutôt que sèche.

Les piles de tourbes ont des dimensions fixées par les usages locaux, et sont la mesure commerciale usitée. La pile du département de la Somme est de 11 mètres cubes environ ; la pile de Paris est de 16 à 17 mètres cubes; elle a la forme d'une pyramide tronquée à quatre faces. Les dimensions de la base inférieure sont 5m,52 de long sur 2m,92 de large; de la base supérieure, 4m,87 sur 2m,27 ; la hauteur est de 1m,30. Cette pyramide se termine par un comble de tourbes entassées sur 0m,65 de hauteur verticale. Les murailles s'élèvent en empilant les tourbes en retraite l'une sur l'autre ; on remplit l'intérieur de tourbes à la main ; on a soin de placer les plus sèches dans l'intérieur, et les moins sèches dans les murailles et sur le comble.

Les piles, quand elles doivent passer sur le pré une partie de l'au-

Digitized by Google

tomne et surtout l'hiver, doivent être couvertes; autrement les pluies et les gelées produiraient un déchet énorme. On couvre les piles, en Picardie, avec de grands roseaux sur les côtés, et de la litière ou du chaume sur le comble. Les mêmes roseaux et la même litière peuvent servir pour deux ou trois campagnes, sans grand déchet.

Retrait des tourbes par la dessiccation. — Les tourbes extraites au louchet éprouvent, par la dessiccation, un retrait variable, et qui va quelquefois jusqu'à $\frac{8}{11}$ du volume primitif. Ainsi, les tourbes du marais de Brêles, près Beauvais, ont, après la dessiccation, 7 pouces 5 lignes de long, sur 2 pouces 6 lignes en carré. (Garnier, *Ann. des Mines*, 2e série, t. I, p. 51). En général, le retrait est moins considérable, et le volume, réduit par la dessiccation est évalué moyennement aux $\frac{5}{8}$ du volume de la tourbe humide.

Le poids du mètre cube de tourbe en mottes empilées sans ordre est aussi très-variable. Ainsi, on trouve pour le poids du mètre cube:

		Kil.
Tourbe de Rothau.		300
Crouy-sur-Ourcq,	tourbe mousseuse.	250
Id.	tourbe compacte, après 18 mois de dessiccation	340
Tourbe de Brêles, près de Beauvais.		455

Le mètre cube contient environ 1000 tourbes.

La dessiccation n'est complète qu'au bout d'un temps très-long.

En admettant que 1,000 tourbes font 1 mètre cube de tourbe empilée, chaque tourbe humide ayant 30 cent. de long sur 8 cent. en carré à peu près, 1000 tourbes humides font un volume de 2 mètres cubes environ, qui se réduisent à 1 mètre cube de tourbes sèches. Il faudra donc, pour obtenir 1 mètre cube de tourbes sèches empilées, tant vide que plein, plus de 2 mètres cubes de matière tourbeuse, et l'excès variera avec la nature de la tourbe qui donnera plus ou moins de déchet à l'extraction et au séchage.

Tirage de la tourbe à la drague. — Lorsque l'affluence des eaux est considérable, que leur épuisement occasionnerait de grandes dépenses, et que l'on ne peut pas même mettre à découvert la surface du banc de tourbe, l'extraction se fait sous l'eau, à la drague. Pour l'extraction de la tourbe molle, on emploie une drague semblable à celle dont on se sert pour tirer le sable des rivières. Lorsqu'elle a assez de consistance, on emploie un cercle tranchant en tôle, fixé à l'extrémité d'un manche de bois, et au contour duquel est suspendu un

filet à mailles plus ou moins serrées, suivant la nature de la tourbe, *fig.* 22, *Pl. IX.*

Les dragues à filets dont on se sert en Hollande ont des dimensions variables dans les limites suivantes: les cercles tranchants sont elliptiques; les deux diamètres sont 12 pouces et 9 pouces pour les plus petites, 22 pouces et 15 pouces pour les plus grandes, 14 pouces et 11 pouces pour les moyennes (*Journal des Mines*, vol. XV, p. 343). La largeur du fer est de 1 1/2 à 2 pouces, son épaisseur de 5 lignes. Il est fixé à un manche dont la largeur varie de 8 à 18 pieds, suivant la profondeur à laquelle la tourbe doit être extraite. Le filet, à mailles plus ou moins serrées, est attaché au cercle au moyen de ficelles ou de courroies de cuir plus ou moins longues et plus ou moins espacées, suivant la nature de la tourbe.

Lorsque l'excavation a peu de largeur, le tireur à la drague se tient sur un madrier placé en travers de la fosse, ou bien appuyé d'un côté sur le bord, de l'autre sur un bateau ou un radeau amarré dans une position convenable. Dans le cas où les dimensions de l'excavation sont considérables, le tireur à la drague est dans un batelet qu'il remplit de la tourbe extraite. Il conduit ce batelet au rivage lorsqu'il est rempli. Il existe dans le département du Pas-de-Calais un très-grand nombre de marais tourbeux appelés *clairs*, dont quelques-uns ont une superficie très-étendue, où la tourbe est extraite de cette manière. Les batelets chargés sont souvent conduits à de grandes distances par de petits canaux appelés *filets*, qui communiquent avec le *clair*. Celui des communes de Saudemont, Écourt, Saint-Quentin et Palluel dans la vallée de la Gensée, a une superficie d'environ 500 hectares et une profondeur variable de 1 à 9 mètres. Les tireurs vont dans de petits batelets chercher la tourbe à cette profondeur avec des dragues de 10 à 12 mètres de longueur (*Journal des Mines*, vol. XXVI, p. 131).

Moulage des tourbes molles. Dans tous les cas, la tourbe extraite à la drague ou au filet doit être moulée; le procédé de moulage est différent, suivant le degré de consistance de la tourbe. Lorsqu'elle est tout à fait molle, on forme sur le pré d'étente, dans une partie bien horizontale, un encaissement rectangulaire avec des planches de 7 à 15 pouces de hauteur, maintenues par des piquets. On jette dans cette enceinte la tourbe molle; l'eau est en partie absorbée par le sol, en partie évaporée. Lorsqu'elle a éprouvé un commencement de dessiccation, on trace sur la surface du tas de tourbe deux systèmes de lignes se croisant à angle droit qui divisent la masse en parties prismatiques ayant un pied carré de base. Quand la dessiccation est encore

plus avancée, on lève la couche de tourbe, qui se divise naturellement en carreaux, que l'on empile pour compléter la dessiccation.

Lorsque la tourbe, quoique molle, n'est pas suffisamment liquide pour pouvoir être étendue ainsi sur le sol, on lui donne une forme régulière dans des moules semblables à ceux du briquetier, fermés sur une des deux larges faces par un treillage en osier : la tourbe est portée en brouettées près de la place d'étente, et le mouleur remplit son moule, qu'il vide sur le lieu de l'étente.

Quelquefois la tourbe est délayée avec de l'eau avant le moulage ; dans ce délayage, on ajoute simplement assez d'eau pour que la tourbe puisse se réduire en pâte ; on la démêle avec les mains ou avec une fourche à trois dents pour en extraire les plantes ou les fragments de bois non décomposés; on comprime ensuite cette tourbe dans un moule avec les mains ou les pieds. On obtient ainsi une tourbe plus compacte et plus homogène, mais qui a supporté les dépenses d'une manipulation de plus. On démêle et on délaye ainsi, non-seulement des tourbes extraites à la drague ou au filet, mais encore quelquefois des tourbes extraites au louchet.

Tirage de la tourbe en Hollande. — Le procédé de moulage que nous venons d'indiquer est usité dans les provinces de Hollande et d'Utrecht, où les tourbages sont exécutés avec beaucoup de soin et de régularité. Voici la description de cette opération, d'après un Mémoire publié dans le *Journal des Mines*, vol. XV, p. 337 et suiv.

Les tourbes sont assez homogènes et contiennent peu de débris de végétaux non décomposés.

On ouvre dans le terrain un fossé ou petit canal de 4 à 6 pieds de large en ligne droite, que l'on met en communication avec le canal navigable le plus voisin, ce qui est presque toujours facile en Hollande; on découvre la tourbe et l'on rejette sur un des bords de la tranchée les terres dont l'épaisseur est de 1 à 2 pieds.

Toute la tourbe extraite de cette fosse doit être placée sur l'autre rive du canal. On piétine l'herbe sur cette rive, où doit être répandue la tourbe presque liquide, et si le terrain a déjà servi à cette opération, ou s'il a été fauché, on y étend un peu de foin.

On place à 3 pieds du bord du canal un baquet ayant 4 pieds 1/2 de large, 7 pieds 1/2 de long. Les rebords, qui ont 1 pied de hauteur, sont évasés et forment avec le fond un angle d'environ 120 degrés ; les rebords et le fond sont liés par des équerres en fer, dont chacune a un œil ou anneau servant à traîner le baquet. Celui-ci est posé de manière que sa longueur soit parallèle à l'axe du fossé.

Le tireur jette dans le baquet la tourbe qu'il peut extraire au louchet.

Un ouvrier placé sur le bord brise cette tourbe avec ses pieds ou à l'aide d'une petite fourche, la délaye en ajoutant une quantité d'eau suffisante qu'il puise dans le canal avec un seau à bascule; il la piétine ainsi, la méle avec un rabot semblable à celui dont on se sert pour faire le mortier, extrait les débris de végétaux non décomposés, les corps durs, etc. Quand le baquet est rempli d'une bouillie de tourbes, il la puise avec une écope et la verse sur le terrain contigu; il forme ainsi un tas de tourbe dont l'épaisseur est de 15 pouces environ, et dont la largeur dépend de la quantité de tourbe qui peut être extraite sans déplacer le baquet. Cette largeur est limitée par des planches maintenues par des piquets qui empêchent la tourbe de s'étendre trop loin. Elle n'excède, pas en général, 30 pieds.

Lorsque le tireur a extrait toute la tourbe qui peut être enlevée au louchet, et que la surface du banc est couverte d'eau, il place en travers du fossé un madrier portant par ses extrémités sur les deux rives, et il extrait à la *drague*, ou plutôt au filet, le reste de la tourbe jusqu'au sol du banc. Toutefois, si le banc est très-épais, il n'extrait la tourbe que sur une portion de sa hauteur suffisante pour couvrir de tourbe en bouillie, sur une largeur de 30 pieds au plus, le terrain contigu à la rive du canal où est placé le baquet. Il abandonne le reste de la tourbe qui sera extrait dans une autre campagne. Il a soin seulement d'approfondir uniformément le canal, de manière qu'un bateau puisse y naviguer partout.

Cela fait, on avance le baquet parallèlement à la rive du canal, en remontant, de manière à l'établir à 6 ou 8 pieds de distance en avant de sa première position.

Opérant de la même manière, on enlève encore la tourbe dans le fossé, et on approfondit l'entaille au louchet et à la drague, au même point que l'entaille voisine. Le mouleur a toujours soin de ne verser la tourbe en bouillie qu'à côté et en arrière du baquet, jamais en avant, parce que cela gênerait l'avancement du baquet.

Le lit de tourbe en bouillie est réduit à une épaisseur uniforme au moyen de larges pelles et de battes, qui servent aussi à le tasser et à l'unir.

Au bout de quelques jours, quand le tas a éprouvé un commencement de dessiccation, des femmes et des enfants marchent dessus, en ayant à leurs pieds, au lieu de chaussures, des planches de 6 pouces de large et 13 à 14 pouces de long. On continue ce piétinement, jusqu'à ce que le tas puisse être marché avec les pieds nus. Alors on le tasse de nouveau avec des pelles ou des battes. Son épaisseur est ainsi réduite de 15 à 8 ou 9 pouces.

On trace alors à sa surface, à l'aide de grandes règles, deux systèmes de lignes rectangulaires distantes de 5 pouces l'une de l'autre.

Après ce tracé, on essaye avec une bêche le degré de dessiccation du tas, et quand elle est poussée assez loin, on divise le tas avec la bêche, en suivant les lignes tracées. On laisse sécher ainsi les tourbes, jusqu'à ce que leur consistance permette de les déplacer. On place alors les tourbes de deux rangées longitudinales, par dessus celles d'une troisième rangée. Quand les tourbes ainsi empilées sont assez desséchées, des femmes et des enfants renversent les tas, mettant dessus celles qui étaient dessous et inversement; quand enfin les tourbes sont suffisamment sèches, on les met en piles sur les lieux, ou bien on les transporte dans les magasins, ce qui peut se faire ordinairement à peu de frais, au moyen de petits bateaux qui vont sur le canal tourbé, et de là dans le canal navigable. Le même canal sert aussi à transporter les terres amoncelées sur la rive opposée à celle de l'étente, aux points où elles peuvent être utilisées.

L'entaille ou canal que nous avons décrit étant épuisé dans une ou plusieurs campagnes, on trace sur un des bords une ligne parallèle à la rive et distante de celle-ci de 4 pieds. On découvre la tourbe de cette bande, et l'on jette immédiatement les terres dans les batelets qui les transportent aux points où on veut s'en servir. La tourbe est ensuite extraite au louchet ou à la drague, et traitée de même. Mais comme le canal est trop large pour que le madrier sur lequel se pose le dragueur puisse porter par ses extrémités sur les deux rives, il est posé d'un bout sur un batelet amarré à la rive opposée à celle de l'étente ou sur un radeau. On conçoit comment on peut ainsi extraire toute la tourbe d'un champ très-vaste. Lorsque la largeur du canal a atteint 22 pieds, on peut avoir un atelier sur chaque rive, et laisser encore au milieu un espace libre pour le passage des petits bateaux.

Enfin, on drague aussi quelquefois en pleine eau, en Hollande, et les bateaux dont on se sert pour cet objet ont, sur un tiers de leur longueur, des banquettes sur lesquelles se place l'ouvrier. Ces banquettes sont posées un peu au-dessous des bords du bateau. On a tracé sur leur surface plusieurs traits de scie, qui augmentent le frottement des pieds nus de l'ouvrier, et l'empêchent de glisser. L'ouvrier a soin de laver ces banquettes avant de s'y poser. On prend les mêmes précautions pour les madriers fixes que l'on place en travers des canaux.

Terre d'ombre de Brühl et Liblar. — On exploite près de Brühl et Liblar, villages situés à trois lieues de Cologne sur la rive gauche du Rhin, un banc très-épais de combustible connu dans le commerce sous le nom de *terre d'ombre* ou *terre de Cologne*. Ce combustible

est un lignite contenant un grand nombre de fragments de troncs d'arbres qui ne sont pas totalement décomposés. On y a trouvé des fruits que l'on a déterminés, et qui appartiennent à des arbres du genre des palmiers; ainsi ce gisement diffère totalement, quant à l'âge, des tourbes composées uniquement de débris de plantes qui croissent actuellement dans nos climats. Néanmoins la terre d'ombre est moulée après son extraction d'une manière analogue aux tourbes. Les moules employés sont des vases semblables aux pots à fleur, ayant la forme d'un trone de cône, et dont le fond est percé de plusieurs trous. Le lignite, après la sortie de la carrière, est mis en tas. On ajoute de l'eau en quantité suffisante, pour qu'il se laisse délayer avec une fourche, dont on se sert pour extraire les débris de bois qui sont plus durs que le reste de la masse. On comprime ensuite dans le moule la matière, qui a la consistance d'une pâte molle, et on la retire en renversant le moule. Puis ces pains sont entassés, pour la dessiccation, en forme de muraille, et empilés; quand ils sont assez secs, on les met en tas dont la forme est celle d'une pyramide quadrangulaire tronquée.

Importance du bon aménagement des tourbières. Mode rationnel d'aménagement. — Le bon aménagement des tourbières est de la plus haute importance pour les contrées qui les possèdent. Les entailles tourbeuses disposées irrégulièrement et sans soin, non-seulement occasionnent la perte d'une très-grande quantité de combustible qui reste perdue pour toujours, mais encore elles deviennent des marais infects, qui rendent le pays très-insalubre, ce que l'on aurait pu éviter presque toujours, du moins en partie, par un meilleur aménagement.

La méthode la plus rationnelle pour extraire la tourbe d'une vallée, consiste évidemment à commencer le tourbage par le bas et à creuser un canal qui, à mesure qu'il montera dans la vallée, la desséchera à une plus grande profondeur. Ce sera la disposition adoptée en Hollande; le canal communiquera par le bas avec la rivière qui coule dans la vallée; sur ce canal, pourront se brancher d'autres canaux latéraux, sur les bords desquels on placera aussi des entailles tourbeuses.

Celles-ci pourront être remblayées après l'épuisement, en y conduisant des cours d'eau chargés de limon, principalement les eaux torrentielles produites par des pluies abondantes. Ces eaux devront évidemment être introduites autant que possible à la partie supérieure du canal, et sortir à la partie inférieure, par dessus une digue qui force les matières en suspension à se déposer.

Google

Lorsque des entailles ont déjà été faites irrégulièrement et sans ordre dans des vallées tourbeuses, il convient, au moins, pour ménager ce qui reste, de pousser jusqu'à épuisement les entailles existantes, avant d'en commencer de nouvelles, de placer celles-ci contiguës aux premières, dans les parties de terrains déjà dégradés et perdus pour l'agriculture, enfin de diriger autant que possible la suite des travaux d'une manière qui puisse favoriser l'atterrissement futur des marais, en y amenant des cours d'eaux chargés de limon qui s'y déposera, ou leur asséchement au moyen de rigoles d'épuisement.

Enfin, lorsque l'atterrissement des entailles est impossible, on a conseillé de planter sur leurs bords des arbres à larges feuilles, tels que des platanes. On pensait que ces feuilles réunies aux plantes marécageuses qui croissent dans les marais, hâteraient la reproduction de la tourbe. Mais cette reproduction n'est rien moins que bien constatée, pour les tourbes compactes, et exige au moins un espace de temps très-considérable. Dans tous les cas, les plantations d'arbres sont utiles, parce qu'elles fourniront un moyen de remplacer les tourbes après l'épuisement des entailles.

Législation des tourbières. — Un très-grand nombre de tourbières, dans le Pas-de-Calais, la Somme, la Loire-Inférieure, etc., appartiennent à des communes, et ont dû rester indivises, en vertu de la loi du 20 mars 1813, qui a ordonné la vente des biens communaux, en exceptant les tourbières et autres exploitations dont les habitants jouissent en commun; l'étendue du sens de cette loi a été expliquée par l'ordonnance royale du 26 décembre 1814. La loi du 21 avril 1810 et le décret du 18 novembre même année, donnent aux ingénieurs des mines la mission de surveiller et de diriger tous les travaux concernant l'extraction des tourbes et l'atterrissement des entailles tourbées. Ces fonctions leur sont surtout pleinement et entièrement dévolues pour les tourbières domaniales et communales. L'exploitation de celles-ci doit se faire d'après un règlement d'administration publique, projeté par l'ingénieur des mines et approuvé par le ministre des travaux publics.

Chaque année, l'ingénieur doit en outre fixer la portion de terrain tourbeux qui sera exploitée par les communes, déterminer le mode d'exploitation qui se fait ordinairement par adjudication et au rabais, présenter des projets de réparations, de constructions nouvelles, de plantations, de vente, de perception et de répartitions des fonds, projets qui deviennent exécutoires par l'autorisation du préfet du département; il est pourvu aux dépenses nécessitées par ces travaux, au moyen d'une légère cotisation au mille de tourbes. (Instruction pour

les ingénieurs en chef des mines, du premier septembre 1814; *Journal des Mines*, t. 37, p. 439 et suivantes.)

Usages de la tourbe. — La tourbe sert, dans les pays où elle est abondante, au chauffage domestique et à celui des chaudières de machines à vapeur et autres. Son pouvoir calorifique est à peu près le même que celui du bois, et souvent un peu supérieur; elle a l'inconvénient de donner une fumée épaisse d'une odeur excessivement désagréable. La carbonisation en est difficile, et réussit beaucoup mieux en vase clos qu'à l'air libre. Les tourbes des vallées contiennent habituellement une forte quantité de cendres (de 7 à 18 p. 100), qui sont généralement employées avec avantage pour l'amendement des terres. A Beauvais, l'hectolitre de cendre de tourbes, pesant 57 kilogrammes, se vend à peu près 75 c. Les tourbes des pays de montagnes sont plus pures que celles des vallées, et sont utilisées pour les opérations métallurgiques. Ainsi, la tourbe crue exploitée dans le comté de Monmouth, est employée concurremment avec le charbon de bois, pour l'affinage de la fonte, dans de petits foyers où l'on prépare le fer destiné à la fabrication du fer-blanc. La tourbe carbonisée du Fichtelgebirge est employée pour la fusion des minerais au haut-fourneau, concurremment avec le charbon de bois; à Rothau, on l'a utilisée dans les foyers d'affinerie. Enfin, dans plusieurs localités, notamment à Ichoux, dans le département des Landes, on emploie avec succès la tourbe crue séchée pour le puddlage de la fonte.

Digitized by Google

CHAPITRE V.

EXCAVATIONS SOUTERRAINES.

Dénominations diverses des excavations souterraines. — Les excavations souterraines qui ont pour but d'atteindre un gîte, pour le mettre en communication avec le jour, ou avec des excavations préexistantes, ont une section transversale de petites dimensions comparativement à leur longueur; on les nomme *puits* ou *galeries*, suivant que leur axe se rapproche davantage du plan vertical ou du plan horizontal.

Les excavations creusées dans le sein même du gîte, pour l'extraction des minerais qu'il renferme, ont des formes et des dimensions variables avec celles du gîte. On les nomme, en général, *tailles* ou *chantiers* d'exploitation. On conserve le nom de puits ou galeries aux excavations allongées qui servent à découper la masse du gîte, ou à la circulation intérieure. On nomme *chambres* d'exploitation les tailles pratiquées dans des gîtes très-puissants, et dont la hauteur verticale diffère assez peu des dimensions horizontales.

Indépendamment des deux classes principales d'excavations que nous venons d'indiquer, on en pratique d'autres qui sont destinées soit à contenir des engins divers, tels que des manéges à chevaux des roues hydrauliques ou des machines à vapeur, qu'il est quelquefois utile d'installer souterrainement, soit à recevoir des dépôts de minerais ou approvisionnements, soit à exécuter certaines manœuvres particulières qui exigent un emplacement plus grand que celui qu'offrent les galeries ordinaires, soit à contenir des eaux, etc. Ces excavations sont désignées, suivant leurs destinations respectives, sous les noms de *chambres* ou *cages* des machines, places de dépôt, d'accrochage, de chargement, *puisards* ou *réservoirs*. Elles sont exécutées tantôt dans la roche stérile, tantôt dans le gîte, ou partie dans l'une et partie dans l'autre.

Dimensions et creusement des galeries. — Les dimensions de la section transversale d'une galerie dépendent de l'usage auquel elle est destinée, et sont fixées en conséquence.

Quand les galeries sont sensiblement horizontales, ou que le sol a une pente ascendante, les eaux affluentes s'écoulent naturellement soit au jour, soit dans l'excavation à laquelle se rattache la galerie entreprise. Quant aux galeries inclinées en descendant, il faut pourvoir à l'épuisement des eaux, quand il en arrive, en même temps qu'à l'extraction des déblais.

Nous traiterons d'abord des galeries horizontales ou à pente ascendante, de sorte que nous n'aurons pas à nous occuper pour le moment des moyens d'épuisement des eaux.

Le mode de creusement et les outils employés diffèrent avec la nature de la roche traversée. Dans les roches dures et tenaces, on emploie la poudre, la pointerole, les coins aciérés. L'excavation une fois faite se soutient naturellement sans étais ni muraillement. Dans les roches demi-dures ou tendres, on emploie le pic et les coins en fer, concurremment avec la poudre. Après avoir excavé la galerie sur une étendue plus ou moins grande, suivant la solidité du terrain, il faut généralement soutenir par des étais de bois, ou par un revêtement en maçonnerie, les parois qui, sans cela, finiraient par s'ébouler. Dans les roches ébouleuses ou les terrains coulants, le boisage ou le muraillement doivent suivre de très-près, et quelquefois même *précéder* le creusement de la galerie.

Une galerie étant entreprise dans un but déterminé, soit pour servir à l'écoulement des eaux, au roulage des minerais, ou à établir des communications intérieures, on a dû fixer d'avance sa hauteur, sa largeur, sa direction, et la pente du sol. Les galeries sont ordinairement exécutées à prix fait, à raison d'une somme déterminée par mètre courant; il importe que l'exploitant ou le contre-maître surveille exactement l'observation rigoureuse des conditions relatives aux dimensions, à la direction et à la pente, sans quoi il arrivera toujours que les entrepreneurs se jetteront du côté où la roche sera le plus facile à abattre, donneront au sol une inclinaison ascendante plus forte que celle dont on est convenu, et feront la galerie plus étroite au sol, pour s'éviter la peine d'abattre la roche dans les angles. Or, dans les galeries destinées au roulage et à l'écoulement des eaux, la largeur au sol et la pente sont deux points de la plus haute importance. Il faut donc donner à l'entrepreneur une mesure de la largeur exigée, et un niveau de pente; il consiste simplement en un *niveau* de maçon, *niveau à perpendicule* ordinaire, et une règle d'un mètre de longueur par exemple, dont une des faces est inclinée sur la face opposée, comme le sol de la galerie doit l'être sur le plan horizontal. Ainsi, si la pente est fixée à 2 millimètres par mètre, la règle ABCD,

fig. 13, *Pl. XII*, d'un mètre de long, aura à l'extrémité BD une épaisseur supérieure de 2 millimètres à l'épaisseur AC. La règle étant posée sur le sol, dans la direction de l'axe, et appuyée sur la face longitudinale CD, la face AB devra être horizontale, quand l'extrémité AC sera tournée vers le bout de la galerie, ce dont on s'assurera avec le niveau à perpendicule N.

Creusement des galeries dans les roches dures. — Dans les roches dures, les galeries sont excavées à la poudre, et avec la pointerole, ou des coins en fer aciéré. Leur section est ordinairement un trapèze, dont le côté horizontal supérieur est remplacé par un demi-cercle ou une autre courbe convexe vers le haut, *fig.* 1 et 2, *Pl. XII.* On leur donne au moins 1 mètre de largeur à la base sur 1m,70 de hauteur, et le plus souvent 1m,50 de largeur à la base sur 2 mètres de hauteur, à moins que l'usage auquel la galerie est destinée n'exige des dimensions plus considérables. Si les dimensions étaient moindres que celles que nous venons d'indiquer, le prix de l'excavation resterait à peu près le même, et le travail avancerait moins rapidement, de sorte qu'il y aurait à les diminuer un désavantage qui ne serait compensé par aucune économie. Toutefois on donne généralement aux galeries horizontales exécutées dans des filons, ou des couches fortement inclinées, une largeur égale à celle du gîte lui-même, lorsque celle-ci n'est ni trop exiguë ni trop grande, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 0m,70 et 2m,00. On dépasse même cette dernière dimension quand le gîte est encaissé dans une roche telle que l'excès de largeur ne diminue par la solidité de la galerie.

Quand on veut faire avancer le plus vite possible l'exécution d'une galerie, ayant, par exemple, 1m,50 de largeur en bas sur 2 mètres de hauteur, on doit y occuper six ouvriers mineurs, qui travaillent deux à la fois, et se relèvent de huit heures en huit heures, de sorte que le travail n'est jamais interrompu. Dans certains cas même, on ne fait travailler les ouvriers que pendant six heures consécutives. Le travail est ainsi poussé à quatre postes dans la journée. Il est convenable d'agir ainsi dans les galeries où le travail serait rendu plus pénible par l'affluence des eaux, ou toute autre circonstance. Les déblais abattus sont d'abord enlevés à la brouette, et dès que la galerie est un peu avancée, il convient, si elle doit avoir une longueur un peu considérable, d'y établir, pour la sortie des déblais, un chemin de fer que l'on prolonge en même temps que la galerie. Le prix du mètre courant varie d'ailleurs entre des limites très-étendues, suivant la nature, la dureté, la texture de la roche; il est rarement supérieur à 100 fr., ou inférieur à 25 fr. L'existence de salbandes, ou de veines

tendres dans lesquelles le mineur peut faire la première entaille, facilite surtout beaucoup le travail, dans les galeries qui suivent la direction d'une couche ou d'un filon. Voici quelques exemples.

Exemples de galeries creusées dans le granite. — A Vaury (Haute-Vienne), une galerie entreprise pour des recherches de minerai d'étain, sous la direction de M. l'ingénieur Manès, était exécutée dans un granite de résistance moyenne et sans fissures; la section était de 1m,150 sur 2 mètres, et le travail était fait par 6 ouvriers mineurs qui se relevaient de huit heures en huit heures. La dépense par mètre courant a été comme suit :

	fr.	c.
20 journées de mineur, à 1 fr. 50 c.	30	»
3 *id.* de manœuvre pour l'extraction des déblais, à 1 fr.	3	»
4 kilogrammes de poudre de mine, à 2 fr. 10 c. . .	8	40
2kil,3 de chandelles, à 1 fr. 60 c.	3	68
Entretien et réparation des outils, à 75 c. pour chaque journée d'ouvrier.	15	»
Total.	60	08

Un ouvrier mineur usait dans un poste 5 fleurets et 8 pointerolles qui étaient reforgées et rechargées d'acier, au prix de 4 cent. par pièce, ce qui faisait 52 cent.; l'usure des outils est évaluée à 23 c.

Dans la même localité, une autre galerie, exécutée dans un granite excessivement résistant et fissuré, a coûté par mètre courant :

	fr.	c.
45 journées de mineur, à 1 fr. 50 c.	67	50
3 journées de manœuvre, à 1 fr.	3	»
5 kilogrammes de poudre, à 2 fr. 10 c.	10	50
4kil,75 de chandelles, à 1 fr. 60 c.	7	60
Entretien et réparation des outils, à 75 c. par journée de mineur.	33	75
Total. . . .	122	35

Galeries creusées dans les terrains houillers. — A Roche-la-Molière (Loire), une galerie de 2 mètres de largeur sur 2 mètres de hauteur, exécutée à prix fait, dans un grès houiller extrêmement dur, et rempli de gros fragments de quartz, a coûté 135 fr. le mètre courant, y compris le transport des déblais à une distance moyenne de 40 mètres, et leur chargement dans des tonnes circulant dans un puits

vertical, à partir duquel la galerie était commencée. Un mètre courant exigeait à peu près 25 journées d'ouvrier mineur, et 7^{k},50 de poudre de mine.(la journée d'un mineur, dans le département de la Loire, se paye environ 3 fr. 50c .). Au prix de 135 fr., il faut encore ajouter la dépense d'entretien des outils, qui demeurait à la charge des exploitants, et qui s'élevait à environ 10 fr. par mètre courant.

Les détails qui suivent sont relatifs à une galerie à travers bancs, exécutée dans le terrain houiller des environs d'Alais, entre les mines de houille dites de Rochebelle et de Cendras, exploitées par la compagnie des fonderies et forges d'Alais. Je les dois à l'obligeance de M. Beau, directeur des mines de cette compagnie.

La galerie à travers bancs, prise au niveau de la galerie *Nationale* pour venir recouper les couches exploitées à Rochebelle, présentait le 30 avril 1843 le profil donné dans la *fig.* 2, *Pl. XIII*. Lorsqu'on l'a commencée, les rouleurs avaient 606 mètres de longueur à parcourir dans l'ancienne galerie, dite *Nationale*, qui avait été déblayée et relevée antérieurement, sur un chemin de fer à pente variable, mais en moyenne de 0^{m},014 par mètre. Cette pente est beaucoup trop forte, et, à partir du commencement, on n'a donné au sol de la traverse que 0^{m},005 de pente par mètre. L'effort des rouleurs pour descendre chargés est alors à peu près le même que pour remonter à vide; le chariot que l'on emploie est à roues fixées sur l'essieu : il est de même dimension que ceux employés à l'extraction du charbon, et pèse en moyenne 190 kil. Les vases qui contiennent les déblais sont des paniers au nombre de trois par voyage, chacun d'eux pesant 29 kil. en moyen état, et contenant 225 kil. de déblais. Le chemin de fer posé dans la traverse est semblable à celui des autres galeries de roulage, et revient tout posé à 6 fr. le mètre courant. Les caisses d'aérage étaient suspendues à la couronne de la galerie par des cordes passant sur des crochets fixés dans des tampons de bois enfoncés dans le rocher. On n'a jamais eu besoin de ventilateur pour l'aérage de la traverse; les caisses ont aujourd'hui 172 mètres de longueur, et suffisent pour enlever rapidement la fumée et le mauvais air. L'air est très-facilement respirable à l'avancement, et les lampes y brûlent parfaitement.

On trouvera ci-dessous le tableau des avancements faits chaque mois, et le prix qu'on payait aux ouvriers qui, depuis le mois de juin 1841, avaient à leur charge la fourniture de la poudre, de l'huile, de la graisse, du papier, et enfin les réparations d'outils et le déchet que le travailleur leur faisait subir.

On compte généralement à Rochebelle qu'un kilog. de poudre fait 11 cartouches, et que la dépense en papier est de 2 fr. 50 c. par 100

kilog. de poudre. Enfin, un ouvrier consomme pour 20 centimes d'huile par poste de 10 heures de séjour dans les travaux.

La galerie a 2 mètres de hauteur au-dessus du chemin de fer en tout 2m,10 à 2m,12 au-dessous, et 1m,70 de largeur au niveau de ce chemin. La couronne de la galerie est arrondie en voûte de 1m,50 de largeur à sa naissance. Enfin, les mineurs doivent faire sur une des parois de la galerie une rigole de 0m,20 de largeur et de 0m,10 de profondeur au-dessous des traverses. Tout redressement ou mise à pente (0m,005) de la galerie est fait par la compagnie, au compte des entrepreneurs, sur la paye desquels il a été retenu un cautionnement. Les entrepreneurs font à leur compte la pose du chemin de fer et des bois s'il en est besoin; ils font entrer à leurs frais tous les boisages et bandes qui leur sont nécessaires. La compagnie fournit le chariot, les bois, les bandes de chemin de fer, les caisses d'aérage, les crochets et les cordes nécessaires. La pose des caisses d'aérage, est aussi à son compte. Jusqu'au 9 décembre 1841 les pointes et les têtes de fleurets se payaient 5 c. et les aciérages 15 c. Ces objets se payent, depuis cette époque, 0 fr. 025 et 0 fr. 15; les outils neufs sont livrés par la compagnie aux entrepreneurs au prix de 70 c. le kil. pour les fleurets, 1 fr. et 1 fr. 10 c. les pics, massettes et pelles, et elle reprend les vieux outils sur estimation faite par un de ses agents, faisant en sus de la moins-value payer le déchet au prix des outils neufs.

Montant des outils fournis aux ouvriers et payés par eux.

	Paniers.	Banastons.	Lampes.	Outils.	Pelles.	Fers de paniers Trilleaux.	Graisse.	
	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	
Octobre 1840.	6,75	»	3	»	»	»	»	Les ouvriers pendant longtemps se sont fournis de graisse et autres menus frais, ainsi que du papier et de l'huile qu'ils consommaient. J'ai donné plus haut la valeur de l'huile qu'ils consommaient par journée de travail.
Novembre. . .	»	»	»	7,35	»	»	»	
Décembre. . .	»	0,50	»	»	»	»	»	
Janvier 1841.	»	»	3	19,30	»	»	»	
Février. . . .	3,25	»	6	»	1,10	»	»	
Mars.	5,05	»	»	»	1,30	»	»	
Avril.	»	»	3	»	»	9,15	»	
Mai.	9,00	»	»	»	3,35	»	»	
Juin.	6,75	»	3	»	»	»	»	
Juillet. . . .	»	»	»	»	»	»	»	
Août.	4,50	»	3	»	»	»	»	
Septembre. .	»	»	»	»	»	»	»	
Octobre. . . .	»	»	»	»	»	»	»	
Novembre. . .	4,50	»	»	»	»	»	»	
Décembre. . .	»	»	»	»	»	»	»	
Janvier 1842.	»	»	»	»	»	»	»	
Février. . . .	4,50	»	»	»	»	»	»	
Mars	»	»	»	»	»	»	»	
Avril	»	»	»	»	2,20	»	»	
Mai.	6,75	»	»	»	»	»	»	
Juin.	»	»	»	»	»	»	»	
Juillet.	»	»	»	»	»	»	»	
Août.	»	»	»	»	»	0,30	»	
Septembre. .	4,50	»	»	»	»	»	1,70	
Octobre. . . .	»	»	»	»	»	»	»	
Novembre. . .	»	0,50	»	»	»	»	1,70	
Décembre. . .	2,25	0,50	»	»	»	»	3,40	
Janvier 1843.	»	0,50	»	»	»	»	1,70	
Février. . . .	»	»	»	»	»	»	»	
Mars.	6,75	0,50	»	»	»	»	1,70	
Avril.	2,25	0,50	»	»	»	»	1,70	

Digitized by Google

DÉTAIL DU TRAVAIL ET DES DÉPENSES DE LA TRAVERSE.

	Avancement.	Prix.	Total.	Nombre de journées.	Poudre.	Outils.	Réparations d'outils.	Pointes et têtes.	Aciérage.	Masse de secours.	Somme nette à payer aux ouvriers.	OBSERVATIONS.
	m. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	fr. c.	
Octobre 1840.	8,50	30,00	255,00	78,0	35,70	9,75	»	»	»	8,00	201,55	Schiste du mur de la couche nº 5.
Novembre.	4,20	30,00	126,00	43,5	25,20	7,35	»	»	»	6,00	87,45	Schiste.
Décembre.	6,70	30,00	201,00	72,5	42.00	0.50	»	»	»	6,00	152.50	Schiste.
Janvier 1841.	3,20	30,00	96,00	55,5	39,90	22,50	»	»	»	6,00	27,80	Schiste.
Février.	2,00 5,20	32,00 35,00	246.00	67,0	42,00	10,35	»	»	»	6,20	187,45	6 février. Rocher plus tendre qu'il n'était. 13. Banc de schiste noir de 0,25 d'épaisseur. 17. Banc mélangé de charbon plus tendre que les deux autres; du 25 au 28, sondage en avant et écoulement de l'eau des vieux travaux de la couche nº 4.
Mars.	2,80 1,00 f. fr.	32,00 12,00 »	101,60 127,00	26,0 47,0 »	6,30	7,55	»	»	»	4,00	210,95	4 mars. Rencontre de la couche nº 4 pleine de vieux travaux. 21 mars. Trouvé le mur de la couche au sol de la galerie.
Avril.	1,30 à f. fr.	35,00 »	45,50 57,75	30,0 21,0	»	12,15	»	»	»	4,00	87,10	20 avril. La galerie est en plein schiste ; on a de mauvais mineurs.
Mai.	0,25 4,00	40,00 45,00	10,00 180,00	7,0 53,0	6,30 27,30	12,35	»	»	»	5,10	138,95	30 mai. Refus de travailler au prix convenu; rocher de plus en plus dur quoique schisteux.
Juin.	10,40	45,00	468,00	108,0	67,20	»	»	3,55	2,85	8,00	386,40	Jusqu'au 11 juin travail très-irrégulier. A cette époque, des entrepreneurs prennent le prix fait, et on leur fait payer les réparations d'outils que les autres ne payaient pas. Travail à 3 postes.
Juillet.	9,20	»	414,00	82,5	58,80	»	1	4,05	1,05	9,00	340,10	Rien de nouveau en juillet.
Août.	6,50	»	292,50	70,0	50,40	7,50	»	4,40	1,50	0,00	218,70	12 août. Rencontre du grès au sol de la galerie ; il n'est pas trop mauvais. 19. Toute la galerie est dans le grès.
Septembre.	8,50	»	382,50	112,5	75,60	»	»	11,05	3,30	8,00	284,55	Rien de nouveau. Travail en 2 postes de deux mineurs qui sortent les déblais qu'ils font.
Octobre.	8,00	»	360,00	95,0	73,50	»	»	11,20	1,35	8,00	265,95	Rien de nouveau.
Novembre.	5,50	»	247,50	85,0	88,20	4,50	»	15,50	1,05	8,00	130,25	*Idem.*
Décembre.	0,70 4,80	45,00 50,00	31,50 240,00	79,0	84,00	31,35	2,25	8,05	3,15	8,00	134,70	Le 9 décembre, nouveau marché avec les entrepreneurs. Réduction du prix des pointes.
Janvier 1842.	8,00	50,00	400,00	94,0	84,00	»	»	6,60	1,65	8,00	299,75	Absence de rapports des maîtres mineurs pendant mon voyage. Toujours du grès.
Février.	6,00	»	300,00	87,0	67,20	4,50	1,50	10,40	3,15	8,00	205,25	

Mars. . .	8,50	»	425,00	116,0	100,80	»	»	9,75	1,50	8,00	304,95	15 mars. Grès dur. On a trouvé un délit plus tendre sur la drte.
Avril. . . .	8,50	»	425,00	83,0	84,00	2,20	0,50	5,15	0,75	8,00	324,40	8 avril. On a rencontré une porte de schiste. 11. Galerie en plein schiste de la couche nº 5 de cendras. 25. Rocher plus dur après une porte, il y vient de l'eau par des fentes. 29. Coup de sonde en avant et continuation de fonçage.
Mai. . . .	5,70	»	285,00	62,0	33,60	6,75	1,00	7,70	1,95	6,00	228,00	6 mai. Le banc dur se perd. 10. Presque tout de schiste. 13. Schiste à gauche, rocher dur à droite, le schiste suit presque la direction de la galerie. 31. Partie schiste, partie grès.
Juin. . . .	7,30	»	365,00	113,0	84,00	»	3,50	12,65	2,85	8,00	254,00	2 juin. Grès plus puissant. 7. Galerie en plein grès. 17. Porte obliquant à droite sans changer le rocher.
Juillet. . .	5,50	»	275,00	96,0	84,00	»	2,50	8,75	1,95	8,00	169,80	Rien de nouveau en juillet.
Août. . . .	7,50	»	375,00	109,0	75,60	0,30	»	10,15	1,20	8,50	279,25	2 août. Changement d'entrepreneurs; même conditions. 8 août. Porte derrière laquelle le grès est plus tendre et micacé.
Septembre. .	6,50	»	325,00	95,0	75,60	6,20	0,25	8,60	1,95	8,00	224,40	14 septembre. Grès plus tendre au sol.
Octobre. . .	8,00	»	400,00	92,5	92,40	»	1,50	8,60	0,75	8,00	288,75	5 octobre. Porte et grès plus tendre. 23. Nouvelle porte, même grès.
Novembre. .	11,00	»	550,00	114,5	92,40	2,20	0,50	9,20	1,65	8,00	436,05	4 novembre. Un peu de charbon et grès plus tendre. 8. plus de charbon. 18. Plâtre à moitié hauteur de la galerie, et au-dessous 0,03 à 0,04 de schiste. 23. Après avoir pris 0,25 de puissance, le schiste s'est perdu. 25. Nouveau schiste de 0,03 à 0,04 et grès au-dessous.
Décembre. .	13,00	»	650,00	90,5	33,60	6,15	0,50	2,35	»	8,00	599,40	1 décembre. Grès pyriteux et schiste. 7. Moitié schiste. 10. plein schiste, il tombe de l'eau. 17. Petit banc de schiste noir renfermant du charbon. 23. Après s'être perdu, le charbon reparait, c'est la couche nº 1 de Rochebelle.
Janvier 1845.	6,20	»	310,00	90,0	39,90	22,20	0,75	7,50	1,05	8,00	230,60	2 janvier. Banc de grès venant de la couronne de la galerie. 3. Schiste et grès. 6. Grès fissuré, par lequel il vient beaucoup d'eau. 16. L'eau diminue peu à peu et ne coule plus qu'au sol.
Février. . .	6,20	»	310,00	92,0	67,20	».	4	10,95	2,25	8,00	221,60	Rien de nouveau en février. Grès pyriteux.
Mars. . . .	7,00	»	350,00	112,0	84,00	8,95	1,75	15,20	4,65	8,00	227,45	1 mars. Grès pyriteux. 20. Grès dur. 24. Grès moins dur. 30. Grès encore moins dur.
Avril. . . .	14,70	»	735,00	92,0	33,60	4,45	1,25	4,45	0,45	8,00	682,80	4 avril. Schiste venant de gauche à droite. 5. Plein schiste. 6. Boule de grès que le schiste entoure. 13 Partie schiste, partie grès. 14. Grès broyé venant facilement au pic et entremêlé de morceaux plus dur, de schiste et de charbon pulvérulent. 21. Charbon. 22. Moitié de la galerie au charbon, grès au sol. 24. Le grès plonge en avant. Galerie en plein charbon jusqu'au 30, qu'on n'avait pas encore le mur de la couche. On avait fait 5,40 d'avancement dans le charbon.
	222,35		10361,85	2671,5	1854,30 ou 883 kil. de poudre	189,35	18,75	195,80	42,00	230,80	7830,85	

La dépense en boisage a consisté en 48 cadres, composés chacun de 5m, 50 de bois, ou 264 mètres de bois rondin, dont moitié à 40 cent. le mètre et moitié à 90 cent.

	fr. c.	Boisage.
C'est donc.	171 60	274 65
On a employé, en outre, 48 mètres carrés de garniture, à 1 fr. 125	54 »	
Pendant le mois d'avril 1843, on a posé 9 cadres faisant 49m,50, à 0 fr. 90.	44 55	
4 mètres de garnitures, à 1 fr. 125.	4 50	

On a dépensé pour la ventilation de la traverse:

	fr. c.	fr. c.
172 mètres de caisses d'aérage, à 2 fr. 60. c. . .	447 20	553 80
Crampons et crosses pour les soutenir, 16k,10, à 1 fr.	16 70	
Liens en cordes.	29 70	
Pose des caisses d'aérage et des crampons, 0 fr. 35 par mètre.	60 20	

Le total de la dépense pour la compagnie jusqu'au 30 avril 1843, se compose donc de :

	fr. c.
Main-d'œuvre aux entrepreneurs et faux frais. . . .	10,361 85
Main-d'œuvre de la partie faite avant la décision de la traverse.	110 »
Aérage	553 80
Boisage.	274 65
232m,50 de chemin de fer, à 6 fr.	1393 80
Total de la dépense. . . .	12,694 10

Ce qui, déduction faite des frais de boisage et d'aérage, fait revenir le mètre courant, y compris le transport des déblais à une distance moyenne de 700 mètres environ, à 52 fr. 67 c.

Il y aurait à ajouter à ce chiffre l'argent dépensé pour les pointes et les aciérages des fleurets avant le mois de juin 1841; mais on n'a pas conservé de note à ce sujet.

On sera peut-être étonné du peu de régularité qu'il y a dans le nombre de journées de chaque mois, mais cela tient à ce que les comptes étant tenus par semaine, il y a des mois de quatre, et des mois de cinq semaines.

Il résulte aussi de tout ce qui précède, que les entrepreneurs ont touché:

	fr.	c.
La somme de.	10,361	85

Ils ont eu à dépenser les sommes suivantes :

Poudre, 883 kil. à 2 fr. 10 c.	1854 30	3085 60
Outils et réparations	208 10	
Pointes et aciérages	237 80	
Masse de secours.	230 80	
Papier, 2 fr. 30 c. par 100 kil. de poudre. . .	20 30	
Huile, 2,671, 5 postes à 0,20.	534 30	
Somme nette touchée par les mineurs. . .		7276 25

Le prix de la journée, déduction faite de tous frais connus par la compagnie, a donc été de 2 fr. 72 c.

A Decazeville (Aveyron), les galeries de $1^m,50$ sur 2, exécutées dans un grès houiller de dureté ordinaire, coûtent environ 25 fr. le mètre courant, y compris le transport des déblais à une distance qui est souvent de plusieurs centaines de mètres, mais qui est parcourue sur des chemins de fer et avec des chariots fournis par les exploitants.

Dans les mêmes mines, le prix du mètre courant, dans le grès houiller le plus dur, est de 40 à 45 fr.

Galeries creusées dans divers terrains. — Aux mines de pyrite cuivreuse de Sourcieux et du Gervais (Rhône), où la roche est un schiste talqueux dur à entailler, mais qui néanmoins ne peut se soutenir sans boisage, parce qu'il se gonfle lorsqu'il est exposé à l'humidité, le prix moyen du creusement d'un mètre courant de galerie, de 2 mètres de hauteur sur 1 mètre ou $1^m,30$ de largeur, conclu du prix de $670^m,76$ de galeries exécutées sur divers points, est, d'après M. l'ingénieur de Hennezel, de 17 fr. 98 c., savoir :

		fr.	c.
Main-d'œuvre. . . .	6j,69.	12	85
Poudre.	$1^k,33$.	2	80
Huile.	$0^k,80$.	»	96
Papier..	1/3 de main.	»	12
Entretien des outils.		1	25
	Total.	17	98

(L'extraction des déblais n'est pas comprise dans le prix ci-dessus.)

Une galerie de 2 mètres de haut sur $1^m,50$, et de 268 mètres de longueur exécutée aux mines de houille de Faymoreau (Vendée),

pour servir à l'écoulement des eaux et au roulage, a coûté, suivant la relation de M. Fournel (*Étude des gîtes houillers du Bocage Vendéen*) la somme totale de 14,448 fr. 70 c., ce qui fait 53 fr. 89 c. par mètre courant. Elle a été exécutée en grande partie dans un grès poudingue très-dur à gros fragments de quartz. La dépense est ainsi répartie :

	fr.	c.
Main-d'œuvre.	31	35
Poudre.	11	79
Outils	6	77
Bois.	3	98
	53	89

Les frais d'extraction des déblais paraissent entrer pour plus d'un tiers dans les frais de main-d'œuvre, ce qui tient probablement à ce qne la galerie dont il s'agit ne reçut pas dès l'origine un chemin de fer qui y a été installé depuis.

On trouve dans l'ouvrage cité de M. Fournel, que 3 mètres courants d'une galerie de $1^m,60$ de haut sur $1^m,20$ de large, exécutés dans un grès houiller très-dur, ont coûté :

	fr.	c.
27 journées de mineur, à 2 fr. 10 c.	56	70
18 journées de rouleur, à 1 fr. 30 c.	23	40
10 kilogrammes de poudre, à 2 fr. 75 c. . . .	27	50
Usure des outils (500 pointes à 2 fr. 50 c. les 100).	12	50
Total.	120	10

et par mètre courant 40 fr. 03 c.

Les frais d'extraction au jour sont encore ici exorbitants, et constituent près du tiers de la dépense totale de main-d'œuvre.

Les exemples suivants sont empruntés à un mémoire du Bergmeister Bobert (*Archiv. de Karsten*, t. III). J'ai traduit en mesures et monnaies de France.

L'exécution d'une galerie de $2^m,12$ de hauteur sur $1^m,18$ de large, dans le vieux grès rouge du pays de Mansfeld, pour l'exploitation du schiste cuivreux, a coûté moyennement 67 fr. le mètre courant, y compris le transport des déblais à la brouette à une distance de 150 mètres. Le travail était fait à prix fait par neuf ouvriers travaillant trois à la fois. Les consommations par mètre courant, ont été comme suit :

kil.
10,03 de poudre.
1,43 d'acier.
2,24 de fer.
23 journées 1/3.

(Le salaire des ouvriers est très-peu élevé et ne dépasse pas 1 fr.)

D'après une expérience faite avec soin, on constata qu'un mètre cube de roche en place fournissait 2mèt. cub.,485 de déblais, et que ces déblais remplissaient 73 brouettes. Un rouleur, dans sa journée, transportait à une distance de 150 mètres 32 brouettes semblables, qu'il chargeait et déchargeait lui-même. Il employait 2 à 3 minutes pour remplir la brouette; 6 minutes pour parcourir en poussant la brouette pleine, la distance de 150 mètres; 1 minute pour décharger la brouette; 3 à 4 minutes pour revenir à vide; en tout 12 à 14 minutes pour un voyage entier. Il en faisait 32 dans sa journée de 8 heures, sur lesquelles il n'y avait que 7 heures de travail effectif, et transportait ainsi 1mèt. cub.,1 de déblais à 150 mètres, en parcourant une distance totale de $32 \times 300 = 9600$ mètres, moitié vide, moitié chargé.

Dans cette même galerie, un essai fait sur une longueur de 3m,768, par deux mineurs habiles payés à raison de 67 fr. le mètre, fournit les résultats suivants. 1m,884 furent exécutés en 288 heures de travail effectif, et la seconde moitié de la distance, pareillement de 1m,884 (un *lachter* de Prusse), fut achevée en 152 heures de travail. Les consommations furent moyennement par mètre courant de:

kil.
5,24 de poudre.
1,50 d'acier.
1,25 de fer.

Ces ouvriers gagnèrent de très-fortes journées, d'abord parce que travaillant seuls et pouvant revenir à l'ouvrage par intervalles, ils fournirent par jour, jusqu'à 9 heures de travail effectif, et ensuite parce que la roche devint beaucoup moins résistante sur la seconde moitié de la distance.

Une galerie de 41m,50 de longueur, et de dimensions à peu près égales à la précédente, exécutée à prix fait dans une roche de gypse extrêmement résistante, fut payée moyennement 59 fr. 8 c. le mètre courant. Les consommations furent par mètre courant:

kil.
10,48 de poudre.
1,37 d'acier.
4,63 de fer.

84^m, 78 d'une galerie de roulage de dimensions ordinaires, exécutés à prix fait, dans la mine de Morgenstern, au toit d'une couche exploitée de schiste cuivreux, furent achevés en 36 semaines par deux hommes, à raison de 15 fr, 90 c. par mètre courant. Le mètre courant exigea :

kil.
1,56 de poudre.
0,40 d'acier.
1,56 de fer.
4,8 journées d'ouvrier.

Le salaire journalier de l'ouvrier, ressortit à 80 c.

M. D'Aubuisson a publié dans le vol. 17 du *Journal des Mines*, plusieurs exemples de galeries, ayant moyennement 1 mètre de large sur 2 mètres de hauteur, exécutées sur divers filons des environs de Freyberg, ou dans la roche encaissante.

Le prix moyen du mètre cube d'excavation ressort à 21 fr. 69 c., et le mètre courant à 43 fr. 38 c. Les deux prix extrêmes sont par mètre courant, 20 fr. 70 c. et 64 fr. 64 c. Le prix de la journée d'un mineur de 6 heures de travail effectif était de 90 c.; il gagnait généralement un peu plus à prix fait. La poudre et les autres matériaux coûtent à peu près le même prix qu'en France. La roche des environs de Freyberg est un gneiss généralement fort dur ; un mineur faisait ordinairement, dans un poste de 6 heures, deux trous de 0^m,35 à 0^m,40 de profondeur. La matière des filons est aussi généralement fort dure, tantôt adhérente, tantôt non adhérente aux épontes. Leur puissance est ordinairement faible, de sorte qu'on est obligé d'entailler la roche. Dans ces exemples tirés des mines de Freyberg, la dépense de main-d'œuvre est à peu près les deux tiers de la dépense totale. Ainsi dans une galerie qui a coûté 10 fr. 35 c. par mètre cube (20 fr. 70 c. le mètre courant), les dépenses ont été par mètre cube :

	fr.	c.
En main-d'œuvre, pour 4,6 journées de mineur . . .	7	38
Poudre	1	46
Forgeage des outils	1	01
Déchet des outils	»	50
Ensemble. . . .	10	35

Pour une autre galerie qui a coûté 13 fr. 87 c. le mètre cube, les dépenses ont été :

	fr.	c.
En main-d'œuvre, pour 8,72 journées de mineur. . .	8	89
Poudre	2	67
Forgeage des outils	1	34
Usure des outils	»	67
Ensemble. . . .	13	57

Une galerie de 2 mètres de hauteur sur 2 mètres de largeur, dans la houille solide, pouvant se soutenir plusieurs jours sans boisage, et assez résistante pour qu'il soit avantageux d'employer la poudre, coûte 5 à 7 fr. par mètre courant, pour l'excavation seulement. A ce prix, il faut ajouter les frais de transport et d'extraction au jour de la houille abattue.

Lorsqu'une galerie doit servir à la fois à l'écoulement des eaux et au roulage des minerais, et que les eaux sont assez abondantes pour couvrir le sol sur une épaisseur de plusieurs centimètres, on la divise en deux parties, par un plancher horizontal sur lequel est établie la voie de roulage, et au-dessous duquel coulent les eaux, *fig.* 2, *Pl. XII*; le plancher est élevé de 35 à 40 centimètres au-dessus du sol, et on donne habituellement à ces galeries une hauteur de $1^m,80$ au-dessus du plancher, soit $2^m,15$ à $2^m,20$ de hauteur totale. Dans la roche solide, comme nous le supposons ici, le plancher est formé de planches de 3 à 5 centimètres d'épaisseur, clouées sur des solives ou traverses équidistantes, appuyées par les deux extrémités dans des entrailles faites dans la roche, ainsi que le représente la figure. Une des deux entailles doit présenter un évasement ou entrée, dans le sens horizontal, aussi bien que dans le sens vertical, afin qu'on puisse mettre en place la traverse, dont la longueur totale est un peu plus grande que la largeur de la galerie.

Galeries à grande section, dans les terrains durs.— Dans les gale-

ries à grande section, que l'on exécute assez souvent sur le tracé des routes, des grands chemins de fer et des canaux, le travail est conduit par gradins, c'est-à-dire que l'extrémité de la galerie présente la forme d'un escalier à deux ou trois marches assez étendues dans le sens horizontal, pour qu'un groupe d'ouvriers puisse se placer sur chacune d'elles. La roche n'est ainsi engagée sur cinq de ses faces, que sur le gradin supérieur, et dans le reste de la galerie, elle est dégagée sur la face supérieure aussi bien que sur la face antérieure, ce qui facilite beaucoup le travail. Dans ces galeries, l'abattage du mètre cube de roche est beaucoup moins cher que dans les galeries à petite section que l'on pratique pour l'exploitation des mines, non-seulement par suite de la disposition du travail en gradins, mais aussi parce que la grandeur de l'espace facilite le travail de l'ouvrier, et que le volume de la masse totale de roche à détacher, est plus grand par rapport à l'étendue des surfaces de contact. Il est fort rare que le prix de l'abattage du mètre cube de roche, dans des galeries ayant environ 4 mètres de largeur sur 6 mètres de hauteur, ou plus, dépasse 20 fr., et il est ordinairement beaucoup moindre. Ainsi, la galerie exécutée sur le tracé du chemin de fer d'Andrézieux à Roanne, dans une roche porphyrique ou granitique très-dure, n'a coûté que 16 à 17 fr. par mètre cube, y compris le transport des déblais au jour.

La galerie exécutée sur le chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, entre Saint-Étienne et Saint-Chamond, sur 3ᵐ,30 de largeur et sur 5ᵐ,20 de hauteur, a coûté de 12 à 13 fr. par mètre cube. Mais la roche étant assez peu solide, il a fallu l'étayer sur plusieurs points, et muraillcr ensuite, ce qui a augmenté beaucoup le prix du mètre courant.

Voici quels ont été, d'après le major général Burgoyne, les frais de creusement de la galerie souterraine creusée sur la route de Drenodrohur, entre Kenmare et Glengariff, dans le comté de Kerry, en Irlande. Cette galerie, qui a 582 pieds (177ᵐ,39) de long, a été pratiquée dans une roche stratifiée de schiste argileux ordinaire, passant à un schiste siliceux granulaire compacte, et traversée par des veines de quartz. Elle était tenace et dure sur tous les points, et excessivement dure sur quelques-uns. Les couches étaient généralement presque verticales, et leur direction était perpendiculaire à l'axe de la galerie.

Le sol était incliné en remontant, à partir de chaque extrémité vers le milieu, d'un centimètre par mètre, de sorte que le milieu de la galerie était plus élevé de 0ᵐ,89, que chacune des extrémités. On avait d'abord résolu de donner à la galerie une section de 18 pieds de largeur sur 18 pieds de hauteur (5ᵐ,49 sur 5ᵐ,49), mais plus tard, par économie, la largeur à la naissance de la courbe supérieure, fut ré-

duite à 15 ou 17 pieds (4m,57 à 5m,18), et la largeur en bas à 12 pieds (3m,66).

La voûte se soutint parfaitement sans boisage, quoiqu'elle fût très-plate, et que la flèche ne fût que de 6 pieds (1m,83). La partie supérieure fut excavée la première; la section de cette excavation, avait une surface d'environ 96 à 90 pieds carrés (8m. carrés,92 à 8m. carrés,36); le cube total était d'environ 54,324 pieds cubes (1,538m. cubes,13); la dépense fut de 655 livres 16 shillings 8 deniers (16,533 fr. 56 c. C'est 10 frs. 75 c. par mètre cube.

Le corps de la galerie au-dessous de *l'arche*, avait une section de 174 pieds carrés (16m. carrés,16); le cube total était d'environ 94,311 pieds cubes (2,670m. cubes,32); la dépense s'est élevée à 599 livres 1 shilling 11 deniers (15,104 fr. 10 c.), ou 5 fr. 66 c. par mètre cube.

Le coût moyen de cette galerie, par mètre cube d'excavation, a donc été de 7 fr. 52 c., et par mètre courant, de 178 fr. 35. Les matériaux retirés de l'excavation ont été déposés aux deux extrémités, dans des dépressions naturelles du sol.

La dépense totale a été ainsi répartie:

	fr.	c.
Main-d'œuvre, mineurs et manœuvre	15,642	»
Houille et travail de la forge	1,844	34
Fer, 13,109 livres à 1d,7 par livre (5943k,81 à 0fr.,394 le kilogramme)	2,340	12
Acier, 321 livres à 1 shilling la livre (145k,54 à 2 fr. 78 c. le kilogramme)	404	62
Poudre à canon, 7946 livres à 1 shilling par livre (3602k,85 à 2 fr. 78 c. le kil.)	10,015	93
Étoupilles de Bickford, 1745 paquets de 8 yards chacun, à 1 shilling le paquet (12,771 mètres courants à 0 fr. 172 le mètre).	2,199	57
Dépense totale.	32,446	67

Ce total dépasse de 809 fr. 1 c., la somme des deux nombres 16,533 fr. 56 c., et 15, 104 fr. 10 c., que nous avons donnés précédemment; c'est le montant des frais de creusement d'un puits de 34 pieds de profondeur, que l'on creusa, pour hâter le travail, sur la direction de la galerie; ce puits ne fut presque d'aucun usage, et il eût été mieux de ne pas le faire.

Galeries dans les terrains tendres non ébouleux. — Les galeries, dans les terrains qui sont peu durs, sans toutefois être ébouleux, s'exécutent au pic et avec des coins en fer, sans employer la poudre; le terrain se soutient sur une longueur suffisante, et pendant un temps

assez long, pour permettre de placer sans difficulté les étais en bois, ou de construire les revêtements en maçonnerie qui sont indispensables pour prévenir les éboulements ultérieurs.

L'abattage des roches qui se laissent entamer au pic, est beaucoup moins cher que l'abattage de celles qui exigent l'emploi de la poudre; aussi les galeries, dans un terrain tendre mais non ébouleux, coûtent-elles ordinairement moins cher que dans les terrains durs, malgré les frais de boisage et de muraillement. C'est ainsi qu'une galerie de 1^m,50 sur 2 mètres exécutée à Vaury, pour les recherches d'étain dont nous avons déjà parlé, dans un gneiss tendre et décomposé, a exigé par mètre courant :

	fr.	c.
8 journées de mineur, à 1 fr. 50 c.	12	»
3 journées de manœuvre pour l'extraction des déblais, à 1 fr.	3	»
Éclairage.	1	65
Entretien des outils, à 25 c. par journée de mineur (ce qui est fort cher).	2	»
Total.	18	65

Les frais de boisage revenaient, pour les matériaux et la main-d'œuvre, à 11 fr. environ par mètre courant.

Le prix de l'excavation est encore beaucoup moins élevé dans certains cas. Ainsi dans les terrains argilo-schisteux tendres et dans la houille tendre, le prix du mètre courant de galerie boisée, sur la dimension ci-dessus indiquée, n'est ordinairement en France que de 8 à 12 fr., y compris le transport des déblais à une distance de 50 à 60 mètres, sur une bonne voie, et la façon du boisage : le prix des bois reste seul en dehors de cette somme.

Pour exécuter une galerie dont les parois auront besoin d'être soutenues, on pratique d'abord l'excavation capable de contenir le revêtement en bois ou en maçonnerie, en laissant le vide intérieur que l'on veut conserver. Cette excavation est continuée sur une longueur variable avec le degré de solidité de la roche, avant qu'on procède à la construction du revêtement. Quant au travail au pic dans la roche tendre, nous n'avons rien à ajouter à ce qui a été dit dans les notions préliminaires, et il ne nous reste plus qu'à traiter des revêtements. Presque partout, le boisage revient meilleur marché que le muraillement; mais les bois se pourrissent ou cèdent à la pression du terrain, et doivent être généralement renouvelés au bout d'un temps plus ou moins long. De là des dépenses d'entretien qui augmentent avec le

temps qui s'est écoulé depuis le creusement des galeries boisées; tandis qu'un muraillement bien exécuté a une durée à peu près illimitée, et n'exige presque aucune réparation. Il suit de là que l'on boise presque toujours les galeries de mines dont l'existence doit être courte, ne dépasse pas, par exemple, deux ou trois ans, et que l'on muraille les galeries importantes, qui servant au roulage ou à l'écoulement des eaux de mines étendues, doivent avoir une très-longue durée. On comprend au reste que la préférence à donner à l'un ou à l'autre mode de revêtement dépend du prix comparé des divers matériaux dans chaque localité. Nous nous occuperons d'abord du boisage.

Boisage des galeries. — Le boisage d'une galerie consiste le plus habituellement en une série de *cadres*, formés chacun de trois pièces de bois, *fig.* 3, *Pl. XII*, savoir : deux *montants* appliqués contre les parois latérales de la galerie, et un *chapeau* appliqué contre le faîte et reposant sur les extrémités supérieures des deux premières pièces. La distance des cadres dépend de la poussée que le terrain exerce contre le revêtement, poussée qui n'atteint ordinairement son maximum qu'au bout de quelque temps. Quand la poussée est considérable, les cadres sont contigus; généralement ils sont placés à distance, et dans les intervalles qui les séparent, le terrain est soutenu, quand cela est nécessaire, par des *bois de garnissage* appliqués contre le terrain en arrière des cadres, et appuyés sur ceux-ci. Ces bois sont des planches de 3 à 5 centimètres d'épaisseur, ou des *croûtes* (on donne ce nom aux pièces de bois qui sont détachées par la scie sur le pourtour des billes ou tronçons d'arbres destinés à être débités en planches, et qui ont une face plane et une face bombée), ou des bois rondins entiers, ou refendus au coin et à la hache. Il est inutile de dire que les bois de garnissage sont contigus ou écartés, suivant que le terrain tend à s'ébouler en gros ou en petits fragments; qu'on n'en applique pas sur toutes les faces du terrain, mais sur celles seulement où cela est nécessaire.

Quand le sol de la galerie est solide, les montants latéraux sont posés par le pied dans des entailles de quelques centimètres de profondeur, pratiquées à cet effet dans le sol contre les parois latérales. Ces entailles sont nécessaires pour prévenir le rapprochement des pieds des montants, dont l'écartement en haut est prévenu par le chapeau. L'ajustage du chapeau et des montants varie un peu, suivant les circonstances. Le mode le plus ordinaire est celui qui est représenté dans la *fig.* 3 *Pl. XII.* Le chapeau est entaillé aux deux bouts sur une profondeur assez faible, 4 à 5 centimètres. Les montants sont coupés de

Digitized by Google

longueur, et quand on emploie des bois ronds, on se contente de tailler à l'intérieur une petite face plane qui s'appuie sur la saillie de l'entaille du chapeau. Cet ajustage laisse aux montants toute leur force pour résister à la poussée du terrain; mais les entailles pratiquées aux extrémités du chapeau affaiblissent celui-ci, et lorsque la pression du terrain supérieur est forte, il est exposé à rompre, en commençant à se déchirer suivant le prolongement du fond des entailles. L'autre mode d'ajustage consiste à entailler également les extrémités supérieures des montants latéraux et les deux bouts du chapeau, *fig.* 3 *bis*, de façon que les bouts du chapeau reposent *tout entiers* sur les montants. Ce second mode doit être adopté, dans le cas où la poussée latérale du terrain sur les montants latéraux est moins forte que la pression du terrain supérieur sur le chapeau.

La pose des cadres et des bois de garnissage se fait sans difficulté. Après avoir creusé les entailles au sol et coupé les bois de longueur, on met d'abord en place les montants, que l'on tient provisoirement écartés avec les mains ou avec une pièce de bois transversale, jusqu'à ce que l'on ait mis le chapeau. On assujettit au besoin le cadre avec quelques coins chassés entre lui et le terrain, jusqu'à ce que l'on place les bois de garnissage. Ceux-ci sont chassés à coups de masse: ils doivent toucher le terrain et être passés entre lui et le contour du cadre. Quand les bois de garnissage sont contigus, il est très-important de ne laisser aucun vide entre ceux-ci et le terrain. Dans ce même cas, les cours successifs des bois de garnissage doivent se recouvrir, de manière que le cours antérieur dépasse un peu le dernier cadre sur lequel il s'appuie, et qui soutient les têtes des bois du cours suivant. Quand les bois de garnissage ne sont point contigus, les extrémités de ceux du cours antérieur se croisent avec les extrémités de ceux qui appartiennent au cours suivant, et qui s'appuient sur le même cadre.

Lorsque le sol de la galerie manque de consistance, les entailles faites dans le sol ne préviendraient pas le rapprochement des pieds des montants: on fait porter alors les pieds de ceux-ci sur une autre pièce posée transversalement sur le sol, et que l'on appelle la *semelle*. Le cadre de 4 pièces est appelé cadre complet. La semelle sert non-seulement à maintenir l'écartement des montants latéraux, mais encore quelquefois à contenir le sol de la galerie, qui, dans certains terrains, tend à se soulever par l'effet de la pression des masses solides sur le terrain contigu. Ces effets de soulèvement sont fréquents dans les roches tendres et feuilletées, notamment dans les argiles schisteuses des terrains houillers. La semelle remplit, dans ce der-

nier cas, absolument le même rôle que le chapeau, et il convient de poser sur le sol, en dessous des semelles, des bois de garnissage, comme on le fait sur les autres faces. La *fig.* 4 représente la section d'un cadre complet posé dans une galerie, avec bois de garnissage contigus sur tout son contour. Le mode d'ajustage et d'entaillement des bouts de la semelle et des extrémités inférieures des *montants* est celui qui convient, dans le cas où la tendance du sol au soulèvement est comparable à la poussée latérale du terrain sur les montants. Tout ce que nous avons dit de l'ajustage du chapeau sur les montants est d'ailleurs applicable ici. Lorsque la poussée du terrain est très-forte, les cadres complets sont contigus, et couvrent entièrement les surfaces du terrain mis à nu. Les bois de garnissage sont alors inutiles.

Dans des terrains d'une très-faible consistance, et qui exercent une très-grande poussée, on pratique quelquefois des galeries à très-petites sections pour l'écoulement des eaux, l'aérage, ou même l'exploitation; il est économique de les boiser avec des cadres triangulaires, semblables à celui qui est représenté dans la *fig.* 7, *Pl. XII.* Les deux montants latéraux, appuyés sur les deux bouts d'une semelle, sarc-boutent en s'appuyant l'un sur l'autre par leur extrémité supérieure. Ce mode de boisage est solide et économique; mais il a l'inconvénient de laisser à la galerie un vide intérieur d'une forme peu commode, et ne peut s'appliquer par conséquent qu'à des galeries qui ne doivent pas servir au roulage ou à la circulation fréquente des ouvriers.

Dans les mêmes circonstances, et lorsque la poussée du terrain est un peu moins considérable, on emploie aussi le mode de boisage représenté par la *fig.* 6, *Pl. XII.* Les cadres consistent en quatre madriers de 5 à 7 centimètres d'épaisseur, suivant le besoin, et de 30 à 40 centimètres de large, lesquels sont appliqués sur les quatre faces latérales de la galerie, de manière que les extrémités de deux madriers parallèles soient engagées derrière les bouts des deux autres. L'écartement de ceux-ci est maintenu par des pièces de bois prismatiques clouées dans les quatre angles sur les faces internes des premiers. Ces cadres, qu'on appelle aussi *coffres*, sont toujours contigus. L'ouvrier excave à la fois la galerie sur une longueur égale à la largeur du cadre, et met aussitôt un cadre en place : il faut qu'il ait soin de ne pas laisser de vide autour du boisage, et par conséquent de tailler le terrain régulièrement; dans le cas où il se ferait de petites cloches ou éboulements, il tâcherait de les remplir après avoir mis le cadre en place.

On emploie dans les mines militaires des coffres analogues, mais dont les madriers sont assemblés au moyen d'entailles pratiquées d'a-

Digitized by Google

vance. Ce mode de boisage a cela de commode, qu'il n'y entre pas de pièces de bois lourdes et difficiles à transporter. Aussi en fait-on assez fréquemment usage dans les galeries inclinées ascendantes, et dans les autres cas où le transport des matériaux est difficile. On voit plusieurs exemples des modes de boisage indiqués par les *fig.* 6 et 7, dans les mines de cuivre de Pembroke, près Saint-Austle, dans le comté de Cornwall. La masse des filons, dans lesquels les veinules de minerai de cuivre sont ici encaissées, est une roche sablonneuse, peu consistante, et assez fortement pénétrée d'eau.

Lorsqu'on exécute des galeries dans les filons ou les couches, il est fort rare que les parois soient également ébouleuses. Dans certains cas, le faîte seul est ébouleux et a besoin d'être soutenu, tandis que les parois latérales et le sol sont solides; dans d'autres cas, par exemple dans la plupart des filons ou des couches inclinées, il faut soutenir à la fois le faîte de la galerie et le toit du gîte. On boise alors la galerie avec des cadres incomplets, ou portions de cadre. Ainsi, quand le faîte seul est ébouleux, on place de distance en distance des traverses horizontales, qui reposent par leurs extrémités dans des entailles faites dans les parois latérales, et l'on chasse les bois de garnissage entre ces traverses et le terrain. Lorsque la solidité des parois n'est point absolue, et que l'on pourrait craindre que la charge du terrain supérieur ne pût être supportée par les bords inférieurs des entailles, il est bon d'appuyer les deux extrémités des traverses contre des bouts de planche que l'on applique au fond des entailles. On fait entrer à grands coups de masse la traverse coupée de longueur, de façon qu'elle exerce contre les bouts de planche une forte pression, d'où résulterait, dans le cas d'une tendance au mouvement de la pièce horizontale, un frottement qui viendrait en aide à la roche.

La *fig.* 5 représente le boisage d'une galerie ménagée dans un filon fortement incliné, au-dessous d'une taille remblayée. Le boisage consiste en demi-cadres et bois de garnissage. Chaque demi-cadre est composé d'une pièce appuyée contre le toit, et s'élevant plus haut que le faîte de la galerie, de sorte que son extrémité supérieure est engagée dans les déblais, et un chapeau incliné, reposant dans une entaille pratiquée au mur du filon, et appuyé par l'autre bout sur la pièce précédente. L'axe de ce chapeau forme un angle légèrement aigu en dessus de la normale commune au mur et au toit du filon, ce qui fait qu'il ne peut s'abaisser sous le poids des déblais supérieurs sans se rompre. Les bois de garnissage sont contigus, au toit du filon et sur le faîte de la galerie. On remarquera surtout dans cet exemple la position du chapeau, dont l'axe n'est pas exactement normal au toit et au mur du gîte. Cette disposition doit être imitée dans tous les cas analogues.

Dans les galeries boisées, qui ont un plancher de roulage, sous lequel doivent s'écouler les eaux, les traverses horizontales, qui supportent le plancher, sont appuyées sur les montants latéraux des cadres, au lieu de s'appuyer sur la roche comme dans la *fig.* 2. On peut, à cet effet, entailler légèrement les montants, pour recevoir les extrémités des traverses; il est encore préférable de poser ces extrémités sur des *goussets* en bois cloués contre le bas des montants, qui conservent ainsi toute leur force, ou encore sur des longuerines horizontales qui relient les montants d'un même côté de la galerie et sont clouées contre eux.

La forme des boisages est sujette à varier avec les circonstances particulières. Un boiseur habile sait économiser le bois, en l'utilisant de la manière la plus convenable, en le plaçant dans le sens où la résistance à la rupture, sous les efforts qu'il aura à supporter, sera la plus grande possible, en l'appuyant sur la roche de façon qu'il soutienne celle-ci, et que la pression du bois soit dirigée contre la masse du terrain, au lieu de porter sur les bords d'une entaille, quand la résistance de la roche n'est point indéfinie. Ainsi, par exemple, dans le cas de la *fig.* 5, si le toit du gîte était assez solide pour se soutenir sans le secours des montants et des bois de garnissage qui y sont appliqués, mais que cependant la résistance ne fût pas indéfinie, les montants latéraux seraient supprimés, les chapeaux seraient placés immédiatement sous le toit; et au lieu de les faire porter sur les bords d'entailles pratiquées dans la roche, on les placerait dans la position indiquée *fig.* 5, et on les appuyerait par un bout contre la roche du toit, avec interposition d'une planchette un peu plus large que la section du chapeau; le chapeau serait mis en place à coups de masse, et soutiendrait alors la roche du toit tout en s'appuyant sur elle. L'interposition de planchettes entre les extrémités des étais et la roche est très-fréquente dans les mines. Elle a le double avantage de mieux soutenir la roche, et en même temps de faire serrer l'étai contre un corps tendre et élastique dont la réaction le maintient en place et modère la pression exercée sur les fibres du bois dans le sens longitudinal, lorsqu'on le met en place à coups de masse. Nous donnons plus loin les notions élémentaires dont la connaissance est indispensable au mineur, sur la résistance des bois et autres matériaux à la rupture.

Les galeries fort larges sont quelquefois divisées en deux par une file d'étais qui s'appuient sur le sol, et sur les chapeaux des cadres dont la galerie est garnie. Ces étais soutiennent les chapeaux en diminuant la distance entre les points d'appui. Quand on veut se conserver un passsage large entièrement libre et renforcer le boisage, on place

dans les angles des cadres des arcs-boutants ou des goussets, qui relient le montant et le chapeau. Les assemblages de charpente usités dans les constructions ordinaires peuvent être imités avec avantage dans les grandes excavations.

Nature des bois. Prix des revêtements. — Les frais de boisage des galeries dans les terrains tendres, non éboulеux, dépendent surtout du prix des bois, qui varie avec les localités. Les essences les plus employées sont le pin, le sapin et le chêne.

Le prix du bois de chêne de petites dimensions, tel qu'il le faut pour le boisage des galeries de mines, varie généralement en France, depuis 30 jusqu'à 40 fr. le mètre cube. Aux mines de houille du Creusot (Saône-et-Loire), le prix du bois de chêne ayant un diamètre suffisant pour qu'il puisse être équarri sur 10 centimètres de côté, n'est que de 21 fr. le mètre cube. Les barres en chêne employées comme bois de garnissage, ne coûtent que 15 fr. le mètre cube environ. Ces prix sont très-bas, comparativement à ceux du reste de la France; le pin et le sapin sont généralement moins chers que le chêne. Sur les mines de houille de Saint-Étienne, on paye de 45 à 75 c. le mètre courant de bois de pin, ayant au moins 10 centimètres de diamètre au petit bout; les arbres ont 10 à 12 mètres de longueur totale. Dans la même localité, les planches de sapin de 27 millimètres d'épaisseur se vendent environ 2 fr. le mètre carré superficiel. Le prix augmente proportionnellement à l'épaisseur, de sorte que des planches de 54 millimètres se vendent environ 4 fr. le mètre carré.

Au montant du prix des bois, qui peut être assez exactement déterminé, dans chaque localité, lorsqu'on sait le genre de boisage qui convient au terrain, il faut ajouter le montant de la main-d'œuvre du boisage. La pose d'un cadre et des bois de garnissage, y compris l'entaillement des bois et le transport de la surface à l'intérieur de la mine, occupe ordinairement un boiseur et son aide, un tiers ou une demi-journée, suivant que le garnissage doit être plus ou moins complet; en supposant la journée du boiseur à 3 fr. et celle de l'aide à 2 fr., la pose d'un cadre avec les bois de garnissage, reviendrait donc de 1 fr. 66 c. à 2 fr. 50 c. Dans une galerie boisée où les cadres seraient distants d'un mètre, il faudrait ajouter la somme ci-dessus au prix des bois, pour obtenir le prix du boisage par mètre courant. Quand il ne faut pas de bois de garnissage, et que la galerie doit être boisée, par exemple, avec des cadres contigus, on peut estimer qu'un boiseur et son aide entailleront et mettront en place quatre cadres dans leur journée.

S'il faut, pour exécuter le boisage, creuser des entailles dans la

roche, le prix dépend de la dureté de celle-ci, et les exemples que nous pourrions citer ne pourraient pas suppléer à la connaissance des localités, et à l'expérience d'un maître mineur ou du directeur de la mine.

Entretien des bordages. — Le boisage des galeries exige un entretien soigné; on doit remplacer les pièces de bois qui ont cédé à la pression du terrain, le plus tôt possible, parce que à la suite de la rupture d'une pièce, la pression du terrain augmente sur les pièces voisines qui céderaient à leur tour, ce qui mettrait bientôt dans la nécessité de faire une réparation beaucoup plus considérable. La réparation du boisage se fait, soit en plaçant un cadre nouveau à côté de celui qui est endommagé, et que l'on laisse le plus souvent en place, soit en enlevant la pièce de bois rompue, pour lui en substituer une autre. Ces réparations ne présentent pas de difficulté, et se payent à peu près sur le même taux que la mise en place d'un boisage neuf, lorsque les dimensions de la galerie n'ont point été diminuées par le gonflement du terrain, et qu'elle n'a pas besoin d'être élargie. Lorsque le terrain doit être attaqué, pour rétablir la galerie dans les dimensions primitives qui auraient été altérées, le travail présente des difficultés qui croissent à mesure que le terrain est moins solide, et qu'il a subi un mouvement plus considérable. On doit alors enlever tous les vieux bois, et la réparation de la galerie est souvent plus coûteuse que le creusement primitif, parce que la solidité du terrain est moindre.

Écorçage des bois. — Les bois employés au revêtement des parois des galeries souterraines, dans le but de soutenir le terrain, sont en général simplement écorcés et non équarris. L'équarrissage diminuerait leur force sans aucune utilité. L'enlèvement de l'écorce paraît favorable à la conservation des bois, surtout quand il a eu lieu assez longtemps avant la mise en place, pour que les couches extérieures du bois aient pu se dépouiller en partie de l'eau qu'elles renferment.

Les étais ronds, formés d'un seul tronc d'arbre, sont les meilleurs. Quand on est obligé de diviser les troncs ou billes, parce que les dimensions seraient plus fortes que ne le demande la nature du terrain, il vaut mieux les fendre à la hache et avec des coins, que de les scier. On évite ainsi de couper les fibres des bois.

Durée des bois. Causes de destruction. — La durée des bois dans les galeries de mines est très-variable. Dans un air chaud, et vicié, ils sont rapidement détruits. L'acacia paraît être l'essence qui résiste le mieux dans ces circonstances. Ce fait a été constaté dans les mines de houille de Carmeaux (Tarn), par M. d'Aubuisson et M. François (Note sur l'emploi du bois d'acacia, *Ann. des Mines*, 3e série, t. VII, p. 561). Des étais d'acacia furent placés au milieu d'étais de bois de

chêne blanc, et de bois de chêne noir, dans une galerie où l'air était stagnant et la température fort élevée. Les bilies d'acacia furent mises en place vertes et garnies de leur écorce; elles avaient de 0m,10 à 0m,18 de diamètre. Les cadres de bois de chêne furent détruits au bout de peu de temps, environ trois mois pour le chêne commun, et deux ans pour le chêne noir, tandis que les cadres d'acacia qui restèrent seuls pour soutenir la poussée du terrain, étaient encore parfaitement sains, quatre ans après la mise en place. L'aubier était seul attaqué sous l'écorce, sur une faible épaisseur (5 à 6 millimètres). M. Chassignet et M. François attribuent la durée du bois d'acacia à nn enduit visqueux, qui paraît sortir de l'écorce et qui s'applique sur l'aubier. Celui-ci est ainsi préservé pendant sept ou huit mois. Au bout de ce temps, il s'altère mais le corps de l'arbre n'est nullement attaqué.

Les bois de chêne, et les bois résineux, le sapin, le pin, se conservent sous l'eau pendant un temps indéfini; car on retrouve dans des mines abandonnées et inondées depuis nombre d'années (40 à 50 ans), les bois qu'on y a laissés dans un état parfait de conservation. Il paraît qu'on parvient à prolonger la durée des bois, en les tenant constamment humectés. Ainsi dans quelques puits des mines du Hartz où les boisages périssaient en peu de temps, sous l'influence d'un courant d'air chaud, on les a préservés en les tenant constamment arrosés par un filet d'eau (Note de M. Regnault, *Ann. des Mines*, 3e série, t. VII, p. 572);

Il résulte de quelques essais de M. Jordan, inspecteur des machines des mines du Hartz, que les bois ont la propriété d'absorber une très-grande quantité d'eau, surtout quand ils sont immergés sous une forte pression, et qu'ils retiennent ensuite avec une assez grande force l'eau absorbée. Celle-ci les préserverait peut-être de la carie sèche, qui, dans la plupart des galeries de mines, est la cause ordinaire de destruction. S'il en était ainsi, il suffirait, pour prolonger la durée des bois, de les faire séjourner pendant un certain temps dans l'eau, sous une forte pression, ce qui serait presque toujours facile dans les pays de mines, où l'on a des puits abandonnés remplis d'eau, au fond desquels on descendrait les bois, qu'on y laisserait séjourner pendant un temps que l'expérience ferait connaître. Ce procédé de conservation serait fort économique, et il est à désirer que les essais de M. Jordan soient continués.

Exécution des galeries boisées dans les terrains ébouleux ou coulants les plus difficiles. — Lorsque le terrain est tout à fait ébouleux, et ne peut pas se soutenir, même sur une distance égale à la

largeur d'un cadre de boisage, il est nécessaire que le boisage précède, pour ainsi dire, le creusement de l'excavation, de manière que la portion de terrain que l'on enlève, soit enfermée dans une enceinte formée de pieux, ou planches jointives enfoncées d'avance, et qui soutiennent le terrain contigu à la masse enlevée. Ce genre de travail, appelé en allemand *getriebe-arbeit*, est l'un des plus difficiles que l'on ait à faire dans l'exploitation des mines, lorsque le terrain est tout à fait coulant, comme le sont certaines couches de sables ou d'argiles imprégnées d'eau. Nous le décrirons en conséquence avec beaucoup de détail. La manière de procéder consiste à établir sur le front du terrain où l'on veut creuser la galerie un premier cadre formé de trois pièces, les deux montants et le chapeau, quand le sol de la galerie est solide et peut supporter la pression des montants latéraux. Si le sol est lui-même mauvais, les montants sont posés sur semelle, et le cadre formé de quatre pièces. Ce cadre étant mis en place, on enfonce dans le terrain les bois de garnissage, qui s'appuient sur son contour, et sont destinés à soutenir les parois de l'espace à excaver. Ces bois sont ordinairement des planches jointives, dites palplanches : d'autres fois ce sont des pieux pointus, pour qu'ils pénètrent plus facilement dans le terrain, et qui ne sont pas tout à fait contigus. Le choix dépend de la nature du terrain. Ainsi, dans un terrain coulant de sable ou d'argile détrempée, les palplanches jointives sont indispensables; dans les terrains qui s'éboulent sans se diviser en très-petits fragments, tels que les déblais qui résultent d'un éboulement antérieur qu'on est obligé de traverser, les bois n'ont pas besoin de se toucher, et des pieux vaudront alors mieux que des planches.

Dans tous les cas, les bois de garnissage doivent être enfoncés dans le terrain en divergeant un peu, de manière que leur ensemble présente la forme d'une pyramide tronquée, dont la petite base est le contour du premier cadre.

Si le terrain n'est pas tout à fait coulant, on peut, aussitôt après l'enfoncement des bois, sur une longueur de 50 à 60 centimètres, commencer à fouiller et à déblayer l'excavation. Arrivé à une petite distance du premier cadre, on en place un second entièrement semblable au premier; on l'établit avec soin, de manière à conserver la direction de la galerie, la grandeur et la forme du vide intérieur. On maintient la divergence des bois de garnissage, en interposant entre eux et le contour de ce second cadre des planches qui sont juxtaposées sur les pièces du cadre, ou repoussées à une certaine distance au moyen de coins en bois chassés entre les pièces du cadre et ces plan-

ches. Le cadre est ainsi maintenu en place par la pression, en même temps que les bois de garnissage sont convenablement écartés. Cela fait, on continue à enfoncer les bois dans le terrain à coups de masse, puis on fouille et on déblaye de nouveau, jusqu'à ce que l'on puisse poser un troisième cadre, que l'on met en place de la même manière que le second, avec interposition de planches entre son contour et les bois de garnissage. Ici, les coins destinés à tenir les planches écartées du cadre sont indispensables.

Après la pose de ce troisième cadre, sur lequel portent les extrémités antérieures des palplanches ou pieux, il est ordinairement nécessaire d'enfoncer d'autres bois de garnissage. Ces bois ne peuvent guère avoir, en effet, beaucoup plus de 2 mètres à $2^{m},50$ de longueur, parce que, s'ils étaient plus longs, ils seraient embarrassants à manier, et ne se laisseraient enfoncer qu'à grand'peine, à cause du frottement résultant de la pression du terrain sur eux. On enfonce donc un second *cours* de palplanches ou de pieux, qui s'appuient sur le contour du dernier cadre, et occupent l'espace ménagé par les coins que l'on a enfoncés au-dessous des planches qui maintiennent écartées les extrémités du *premier cours*. On ôte d'ailleurs ces coins à mesure que cela est nécessaire pour loger les nouveaux bois de garnissage qui tiennent leur place.

Le premier *cours* de palplanches ou pieux est ainsi en recouvrement par son extrémité sur le *cours* suivant, et le travail se continue de la même manière, en ayant toujours soin d'établir les cadres successifs dans des plans parallèles entre eux, normaux à l'axe de la galerie, et de conserver les faces intérieures de tous ces cadres dans le même plan.

La fouille s'exécute toujours au pic, et le déblayement à la pelle, ou avec les mains. Cependant il arrive, quand on a à traverser de vieux éboulements, que l'on rencontre de gros quartiers de rocher, qu'il faut briser à grands coups de masse pour se frayer le passage. On est même quelquefois forcé d'avoir recours à la poudre pour rompre quelques gros blocs. On ne l'emploie que comme dernière ressource, et à très-petite dose, afin d'éviter les projections violentes et les secousses qui pourraient ébranler la portion de galerie déjà exécutée. Quand les terrains sont tout à fait coulants, il devient nécessaire de soutenir les terres du front de l'excavation au moyen de planches, et quand le sol de la galerie est sans consistance, aussi bien que les parois et le faîte, on est obligé de poser les cadres sur semelle, et même d'enfoncer des palplanches dans le sol.

Nous empruntons à un Mémoire de M. le bergmeister Thürnagel, imprimé dans le cinquième volume de l'*Archiv für Bergbau und*

hüttenwesen, la description du procédé usité, dans les cas les plus difficiles, dans la mine de zinc, dite *Friedrichs grube*, près Tarnowitz, en Silésie. Les *fig.* 10, 11 et 12, *Pl. XII*, se rapportent à cette description qui rendra plus facilement intelligible la méthode générale de travail dans les terrains ébouleux, que nous venons d'exposer.

Dès que l'on arrive, dans le percement d'une galerie, au terrain coulant, on doit fermer le fond de la galerie, pour prévenir la chute ou plutôt le coulage des terres. Pour cela, on pose immédiatement contre le fond un cadre, et on applique sur le terrain les planches transversales *a*, *a*, etc., *fig.* 10 et 11, qui sont maintenues par le cadre sur lequel elles s'appuient. Si le sol est mauvais, les montants latéraux du cadre sont posés sur une semelle *b*, de forme demi-cylindrique, coupée dans une bille ou tronc d'arbre de 0m,40 à 0m,50 de diamètre. Cette semelle est posée de façon que la face plane et large s'appuie sur le sol, afin qu'elle résiste mieux à l'enfoncement. Quand on le peut, on pose, dans le même but, sous les extrémités, des morceaux de planches *c*,*c*, dont la longueur dépasse un peu la largeur de la face inférieure de la semelle. Mais cela n'est pas toujours possible dans les terrains très-difficiles. Enfin, on donne à la semelle une longueur suffisante pour qu'elle pénètre, par ses deux extrémités, dans le terrain, aussi loin que possible. Celle-ci étant bien établie, on élève dessus les deux montants *d*, *d*, dans une situation exactement verticale; ils sont dressés aux deux bouts, de manière que les faces des extrémités soient exactement planes et normales à l'axe de la pièce. Par le bas, ils reposent sur la semelle dans des entailles de 3 à 4 centimètres de profondeur; en haut, ils sont réunis par le chapeau *e*, *e*, etc., entaillé à ses deux bouts sur une profondeur pareille. Les extrémités du chapeau ne doivent pas dépasser les montants, mais affleurer exactement les plans tangents extérieurement à ceux-ci.

On doit apporter le plus grand soin à la coupe des bois et à la bonne juxtaposition des pièces, afin que les cadres forment tous des rectangles égaux entre eux (ceci s'entend des arêtes extérieures des cadres). Ordinairement il suffit de prendre, pour les montants et les chapeaux, des parties d'arbre bien droites, de 27 à 30 centimètres de diamètre. Cependant, dans les terrains qui exercent une très-grande pression, on emploie des bois qui ont jusqu'à 45 centimètres de diamètre.

Le cadre étant mis en place, on pose contre les montants et sur le chapeau les planches *f*, *f*, *f*, etc., qui sont écartées à la distance convenable par les coins *g*, *g*.... Avant d'enfoncer ces coins, on vérifie et l'on rectifie au besoin la position des cadres, si elle n'est pas correcte. Les coins s'appuient sur les palplanches, déjà enfoncées dans le terrain

qui résiste, et l'on comprend ainsi comment on peut, en les enfonçant, rectifier la position du cadre qui est ensuite maintenu en place par la pression qu'ils exercent sur lui.

Après cela, on commence à enfoncer les palplanches, en commençant par les deux palplanches contiguës à l'un des angles supérieurs du cadre, et qui sont à cet effet taillées suivant le trapèze représenté *fig.* 29. Elles sont enfoncées le bout le plus large en avant, afin qu'elles se touchent dans toute leur longueur, malgré la forme pyramidale que doit présenter l'ensemble d'un cours de palplanches mises en place. On continue ensuite de garnir le contour du cadre, en enfonçant des palplanches sur le chapeau d'abord, et ensuite sur les côtés. On les enfonce à la fois de 50 à 60 centimètres, souvent aussi de 10 à 12 seulement, suivant que la nature du terrain permet de porter plus ou moins en avant les planches qui soutiennent le front de la galerie, après qu'on les a déplacées pour la fouille et le déblayement des terres.

Les palplanches ont 1m,20 de longueur, et sont prises dans des planches de 4 centimètres d'épaisseur et de 32 de largeur. Dans les terrains très-difficiles, les palplanches et les planches appliquées sur le front de la galerie ont souvent de 5 à 7 1/2 centimètres d'épaisseur.

Pour fouiller et déblayer, on écarte d'abord la planche supérieure, contiguë au faîte de la galerie; on ne l'enlève pas complétement, mais on l'écarte d'abord d'un seul côté, puis de l'autre; on fouille aussi loin que la nature du terrain le permet, sans jamais atteindre l'extrémité des palplanches enfoncées, et l'on reporte en avant la planche, que l'on appuie par deux étais courts, contre les montants latéraux du cadre, en ayant soin de la relever un peu, pour qu'elle vienne toucher par son bord supérieur les palplanches enfoncées, *fig.* 11.

Si le terrain est très-pénétré d'eau, il coule de lui-même, et on le laisse couler, en modérant toutefois le flux, pour qu'on puisse l'arrêter à volonté ; autrement il pourrait arriver que la galerie s'encombrât très-rapidement, et que les bois fussent renversés. Ainsi l'ouvrier, dès qu'il reconnaît qu'une quantité suffisante a coulé sur un des côtés, s'empresse d'arrêter le mouvement, en repoussant la planche et en enfonçant au besoin des tampons de paille dans le terrain. Des étais courts, *fig.* 11, sont forcés à coups de masse entre la planche reportée en avant, et les montants latéraux du cadre. Quand la planche supérieure *a* est ainsi avancée également des deux côtés, il y a entre cette planche et celle qui était d'abord au-dessous, et qui est maintenant en arrière, un vide par lequel le terrain coule quelquefois. On arrête le mouvement en enfonçant des tampons de paille, et au besoin on enfonce une rangée horizontale de petits pieux dont on engage les

extrémités sous le bord de la planche supérieure. On réussit toujours ainsi à maîtriser le flux.

La planche immédiatement inférieure est ensuite reportée en avant de la même manière et à la même distance, et ainsi de suite jusqu'à la planche la plus basse. Si l'on peut enfoncer les palplanches un peu plus avant, on le fait, et l'on reporte ensuite les planches du fond de la galerie à la même distance, jusqu'à ce que l'on ait un espace suffisant pour placer un cadre *intermédiaire* (*einwechsel Gevierte*), qui soutiendra les palplanches dans le milieu de leur longueur à peu près. Ce cadre intermédiaire est entièrement semblable aux cadres *principaux*, et se place de la même façon, avec planches interposées sur le contour, et coins pour maintenir la divergence des palplanches, si cela est nécessaire. Seulement, on prend quelquefois des bois d'un diamètre un peu moindre. On peut d'ailleurs poser un ou plusieurs cadres intermédiaires dans un cours de palplanches, suivant que l'exige la nature du terrain.

Quand on est arrivé près de l'extrémité du cours de palplanches, on met en place un autre cadre principal, avec les planches *f*, *f*, *f*, et les coins *g*, *g*, qui déterminent le vide par lequel on enfoncera un nouveau cours de palplanches, par dessous les extrémités du cours précédent. Les coins sont ôtés, à mesure que les nouvelles palplanches sont mises en place.

Dans les terrains extrêmement difficiles, on ne peut pas opérer avec des planches *a*, *a*, qui s'étendent sur toute la largeur du front de la galerie. On remplace alors chacune d'elles par deux autres plus courtes et plus épaisses, qui se recouvrent sur 5 à 8 centimèt. de large, dans le milieu de la galerie. Ces planches sont étayées, à leur extrémité voisine des parois, contre les montants latéraux du cadre, et à leur autre extrémité contre un poteau vertical établi vers le milieu de la galerie, et allant de la semelle au chapeau du cadre principal. Ce poteau est en outre consolidé, s'il est nécessaire, par un arc-boutant, dont le pied s'appuie sur la semelle d'un des cadres plus éloignés du front. On se procure par là la facilité d'ouvrir seulement la galerie sur la moitié de sa largeur, ce qui est d'un grand avantage dans un terrain très-fluide.

Quand la pression du terrain sur les palplanches supérieures est très-forte, il arrive quelquefois qu'on ne peut prévenir l'abaissement de quelques-unes d'entre elles. Si cet abaissement est assez fort pour empêcher la pose d'un cadre *intermédiaire* ou *principal*, il faut y remédier en soulevant les palplanches abaissées, au moyen de poteaux isolés que l'on place directement au-dessous. Pour se procurer un

Digitized by Google

point d'appui, au sol de la galerie, pour ces poteaux, on étend horizontalement, sur les semelles des cadres qui sont déjà en place, une forte pièce de bois de 4 à 6 mètres de longueur, dont l'extrémité vient toucher les planches appliquées contre le fond de la galerie. On la fixe au moyen de plusieurs poteaux verticaux qui pressent sur elle et s'appuient contre les chapeaux des cadres établis, et on prend sur son prolongement du côté du fond de la galerie le point d'appui des poteaux destinés à relever les palplanches abaissées ou rentrées en dedans.

Quand le sol de la galerie est très-mauvais, et fait craindre que les cadres, malgré leurs larges semelles, ne s'enfoncent dans le terrain, il faut enfoncer aussi des palplanches dans ce sol. On établit à cet effet, par dessus la semelle de chaque cadre principal, une traverse *i*, *fig.* 11, maintenue en place par deux poteaux verticaux appuyés sur ses extrémités et contre le chapeau du cadre. On enfonce ensuite peu à peu les palplanches entre la semelle et cette traverse, dans une direction inclinée sur l'horizontale, jusqu'à ce qu'ils aient pénétré au-dessous de l'emplacement de la semelle du cadre intermédiaire suivant. Celui-ci étant mis en place, on achève d'enfoncer ces palplanches, et l'on peut même ensuite, si la galerie est trop rétrécie, enlever la traverse *i*. Il arrive quelquefois qu'on est obligé d'enfoncer des palplanches dans ce sol, non seulement à chaque cadre principal, mais encore aux cadres intermédiaires.

Un autre moyen de consolider le sol et de prévenir l'abaissement des boisages, consiste à couvrir entièrement avec des madriers de 5 à 12 centimètres d'épaisseur, tout l'espace compris entre les semelles. Les planches sont coupées sur une longueur égale à la largeur de la galerie, posées jointives, quelquefois même réunies par une demi-rainure, et maintenues appliquées sur le sol par des poteaux verticaux, reposant sur leurs extrémités et réunis entre eux par un chapeau. Ce sont d'autres cadres posés dans l'intervalle des premiers.

L'emploi de ces moyens ne prévient pas toujours l'abaissement du boisage, qui du reste n'entraîne pas la destruction de la galerie, lorsqu'il est faible et s'opère régulièrement. Dans les mines de Tarnowitz, on a quelquefois établi la galerie à un niveau supérieur à celui qu'elle devait réellement conserver, et qu'elle a repris par le tassement. On comprend du reste, que ce ne peut être là qu'une opération bien hasardeuse. Il faut mettre les plus grands soins à contenir le terrain, à ne pas le laisser couler plus qu'il n'est nécessaire, afin qu'il ne se fasse pas de vide extérieur au boisage, et à faire de celui-ci une enceinte entièrement fermée qui demeure en place au milieu du terrain mouvant.

Lorsque les galeries ont une largeur un peu grande, qui fait craindre la rupture des chapeaux ou des semelles, on applique contre les parois de la galerie, le long des montants latéraux, des longuerines *k*, *k*, *fig.* 10 et 11, de 6 à 8 mètres de long, posées sur les semelles, et sur lesquelles s'élèvent les poteaux verticaux *m*, *m*, qui supportent les longuerines *l*, *l*, parallèles aux premières et posées sous les chapeaux, dans les angles supérieurs de la galerie. Si les galeries sont encore plus larges, on les consolide par un troisième système de longuerines horizontales et de poteaux verticaux, établi dans le milieu de la galerie.

Dans un terrain excessivement mauvais, c'est déjà gagner beaucoup que de pouvoir avancer, quand bien même le travail serait incomplet, la galerie trop étroite, etc., parce qu'une première ouverture assèche le terrain pénétré d'eau, qui devient ensuite plus traitable. Dans ce but, on a employé une fois à Tarnowitz, avec succès, le procédé suivant, pour l'exécution d'une galerie très-large dont le sol était très-mauvais. On établit les montants des cadres principaux *d*, *d*, *fig.* 12, *Pl. XII*, non pas directement sur les semelles *b*, *b*..., mais sur de longues pièces de bois *n*, *n*, couchées horizontalement sur les semelles, et calées en arrière par les poteaux *o*, *o*. On enfonça les palplanches à moitié, on mit en place un cadre intermédiaire, on compléta l'enfoncement des palplanches, et l'on posa le cadre principal suivant, sur les extrémités de deux pièces de bois longitudinales semblables aux premières. Le *cours* suivant de palplanches fut établi de la même façon, et lorsque le terrain asséché eut pris un peu de consistance, on remplaça ce boisage provisoire par un boisage complet à demeure. L'opération réussit parfaitement; mais il serait impossible de procéder de la même manière, dans des galeries étroites.

La description précédente d'un des travaux les plus difficiles que l'on ait à exécuter dans l'intérieur des mines, est très propre à faire apprécier la méthode de travail avec palplanches ou pieux enfoncés d'avance dans le terrain, dite en allemand *Getriebe-Arbeit* ou *Abtreib-Arbeit*; on en fait un fréquent usage dans les travaux souterrains, pour traverser des terrains ébouleux, coulants, et des déblais qui encombrent de vieux travaux; mais il est néanmoins fort rare que les difficultés soient assez considérables pour nécessiter toutes les précautions qui ont été indiquées. Ainsi il arrive fort rarement que l'on soit obligé de fermer avec des planches, le fond ou le front de la galerie. L'essentiel, dans tous les travaux de ce genre, est d'être constamment maître de modérer l'éboulement des terres, pour qu'il ne se fasse pas de vide extérieur autour de la galerie, et que la masse du

terrain ne soit point ébranlée ; de poser ensuite avec soin les cadres principaux, de façon à conserver à la galerie ses dimensions et sa direction.

Le prix du mètre courant de galerie varie avec celui des bois et des difficultés du terrain, qui peuvent donner lieu à des accidents qui retardent beaucoup le travail. On comprend qu'il doit être quelquefois extrêmement élevé. Lorsque des galeries semblables doivent passer à une profondeur médiocre au-dessous du sol, il est ordinairement plus économique de les exécuter à tranchée ouverte, et de les murailler, après quoi on rejette les terres provenant de la fouille par-dessus la voûte. On peut voir dans la *richesse minérale*, t. II, p. 182 et *Pl. IX* de l'atlas, la description d'une galerie ainsi exécutée en tranchée ouverte, dans un terrain mouvant du pays de Tecklembourg.

DIGRESSION

CONTENANT DES NOTIONS ÉLÉMENTAIRES SUR LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION USITÉS DANS LES MINES.

Avant d'entreprendre la description du revêtement en maçonnerie, ou muraillement des galeries, nous exposerons les notions, sur la résistance des matériaux et des constructions, qui sont indispensables au mineur. Bien qu'on n'ait presque jamais un moyen de déterminer exactement l'intensité et la direction des forces auxquelles doivent résister les matériaux mis en œuvre dans les excavations souterraines, ces éléments peuvent cependant être appréciés avec quelque approximation, soit par des analogies déduites d'observations recueillies dans la localité où les travaux doivent être exécutés, ou ailleurs dans des terrains analogues, soit par l'observation des plans de stratification, ou autres fissures naturelles de la roche, qui font connaître assez exactement la direction des pressions que le terrain exercera sur les boisages ou les muraillements destinés à le soutenir.

Les matériaux que l'on emploie dans les constructions, sont presque exclusivement les bois, les pierres, les briques, les ciments ou mortiers. Le fer n'y entre qu'en petite quantité, rarement, et n'y joue jamais un rôle important. Néanmoins comme ce métal est employé à la construction des voies de roulage, et entre dans la composition de toutes les machines simples ou compliquées, utilisées dans l'exploitation des mines, nous ne pouvons nous dispenser de nous en occuper.

Les bois employés comme étais, ou pour la construction de revête-

ments, dans les excavations souterraines, sont soumis à des pressions qui tendent à les rompre par *écrasement*, en comprimant leurs fibres longitudinales, ou par *flexion*; ils ne sont jamais ou presque jamais soumis à des forces qui tendent à les rompre par *traction*, ou allongement des fibres longitudinales. Mais lorsque les bois et autres corps fibreux sont infléchis par l'action de forces extérieures, une partie de leurs fibres subit une extension, tandis que l'autre partie est comprimée ou raccourcie. D'ailleurs, dans beaucoup de machines usitées surtout dans les mines, il entre des tirants ou longues tiges de bois, qui sont soumis à des forces longitudinales tendant à les rompre par extension. Nous devrons donc aussi considérer la résistance des bois à l'extension de leurs fibres.

Les matériaux qui entrent dans les constructions en maçonnerie, sont soumis à des forces qui tendent à les rompre par écrasement ou compression, ou à les faire glisser les uns sur les autres.

Le fer forgé et la fonte, qui entrent dans la construction des voies de roulage et des machines, sont soumis à des efforts qui tendent à les rompre, soit par compression, soit par extension.

Élasticité des corps. — Sans entrer dans des détails étendus sur la nature des corps solides en général, détails pour lesquels nous renverrons aux traités de physique, et surtout à l'ouvrage de M. Poncelet, intitulé: *Introduction à l'Étude de la mécanique physique et expérimentale;* nous nous bornerons à expliquer ce que l'on entend par *élasticité* et *roideur* des corps. De la propriété commune à tous les corps de se dilater, d'augmenter de volume par une élévation de température, et de se contracter, de diminuer de volume par un abaissement de température, on conclut que les particules des corps sont sollicitées et maintenues en équilibre, à distance les unes des autres, par deux systèmes de forces, les unes répulsives, dont le principe est identique avec celui de la chaleur ou le calorique, les autres attractives, et que l'on a nommées forces de *cohésion*. L'état d'agrégation des particules des corps solides, à une température déterminée, est dû à ce que les forces mutuelles attractives et répulsives qui les sollicitent se font équilibre aux distances où elles se trouvent les unes des autres. Si des forces extérieures sont appliquées à la surface d'un corps semblable, les particules seront écartées ou rapprochées les unes des autres, les distances primitives pour lesquelles il y avait d'abord équilibre entre les deux systèmes de forces seront altérées, et l'équilibre sera détruit. La force attractive l'emportera sur la force répulsive, si les particules ont été écartées, et la force répulsive dominera au contraire la force attractive, si les particules ont été rapprochées. Si l'on

considère, en effet, un corps prismatique allongé, tel qu'une barre de fer ou de bois, ce corps s'allonge d'une certaine quantité, quand il est tiré à ses deux extrémités par des forces égales et opposées, agissant dans le sens et suivant les prolongements de l'axe du corps, et se raccourcit au contraire, quand ces forces, toujours égales entre elles et opposées, agissent dans le sens et suivant l'axe même du corps de dehors en dedans. Dans le premier cas les distances des particules ont augmenté, et les forces attractives l'emportent sur les forces répulsives; car si l'on considère deux parties du corps situées de part et d'autre d'une section transversale normale à l'axe, il est évident que ces deux parties s'attirent mutuellement avec une force égale à chacune des forces extérieures, sans quoi elles se sépareraient par l'action de ces forces; et de même dans le cas où le corps est raccourci, il est évident que ces deux parties se repoussent mutuellement avec une force égale à chacune des forces extérieures, sans quoi le corps serait écrasé par l'action de ces forces. Dans l'un et l'autre cas, l'excès des forces attractives sur les forces répulsives, ou *vice versâ*, peut être considéré comme une force attractive ou répulsive due à l'écartement des particules de leurs positions primitives, et dont l'intensité est égale à chacune des forces extérieures appliquées au corps.

Si l'action de ces forces cesse, les particules du corps cédant à la force attractive ou répulsive développée par la déformation que le corps avait subie, se rapprochent ou s'écartent, en revenant vers leurs positions primitives. Entre certaines limites de grandeur des forces extérieures, et de déformation du corps, celui-ci reprend exactement ses dimensions primitives, après plusieurs oscillations de part et d'autre de ces dimensions. Ainsi, si un prisme a été allongé de la fraction $\frac{1}{m}$ de sa longueur, aussitôt après la cessation de l'action des forces extérieures, il se raccourcit par un mouvement très-rapide, arrive à une longueur plus petite que sa longueur primitive, s'allonge de nouveau, et lorsqu'enfin cet état de mouvement vibratoire est éteint par la communication avec les corps ambiants ou d'autres obstacles, le prisme est exactement revenu à la longueur qu'il avait d'abord. Cette propriété des corps solides de soutenir l'action de forces extérieures, qui ne dépasse pas certaines limites, en se déformant, et sans se rompre, et de revenir exactement à leur forme primitive, après plusieurs mouvements oscillatoires en deçà et en delà de cette forme, lorsque l'action des forces extérieures a cessé, est ce que l'on appelle l'*élasticité*. Pour expliquer les faits observés, il faut admettre que les forces attractives ou répulsives, qui sollicitent les particules d'un

même corps, varient avec les distances de ces particules, et redeviennent les mêmes aux mêmes distances mutuelles. D'ailleurs, ces forces sont annulées pour des distances des particules insensibles à nos organes; car les corps solides sont rompus et les forces moléculaires sont par conséquent annihilées, avant que les distances des particules de ces corps soient assez grandes pour être perçues par nos organes, ou mesurés par nos instruments les plus délicats.

Au delà de certaines limites, variables avec la nature des corps, le solide déformé par l'action de forces extérieures, se rapproche de cette forme, quand l'action de ces forces a cessé, mais il ne la reprend pas complètement. Ainsi un prisme de fer ou de bois, qui aura subi un allongement supérieur à une certaine fraction de sa longueur primitive, se raccourcira après la cessation de l'action de la force, mais restera néanmoins plus long qu'il ne l'était d'abord. On dit, dans ce cas, que l'élasticité du corps a été altérée. Il paraîtrait, d'après des résultats d'expériences qui seront rapportées plus loin, que dans certains corps, qui ont ainsi subi une déformation permanente, un nouvel état d'équilibre moléculaire s'est établi, état qui n'exclurait point l'élasticité; car ce corps déjà déformé peut être encore parfaitement élastique entre certaines limites. Quoi qu'il en soit, on ne doit jamais exposer les matériaux employés dans les constructions, à des efforts capables de les déformer d'une manière permanente, et d'altérer par conséquent leur nature intime, leur état primitif d'agrégation. La détermination de la limite des forces capables d'occasionner une déformation permanente des divers corps solides, est donc le but le plus important pour les applications, des recherches expérimentales sur les résistances des matériaux.

Le raisonnement et l'expérience directe démontrent que les forces attractives ou répulsives développées dans les corps solides, par les variations de distance des particules, sont proportionnelles à ces variations, pourvu que celles-ci demeurent une très-petite fraction de la distance primitive; ce principe de la proportionnalité des forces aux écarts ou rapprochements des particules, est le point de départ des recherches entreprises par les géomètres, sur les conditions de l'équilibre des corps solides. Néanmoins, il résulte des expériences directes faites sur les corps solides, que cette proportionnalité des forces aux variations de distance n'est exacte, au moins pour certains corps, qu'entre des limites de déformation et d'efforts extérieurs inférieures aux limites pour lesquelles l'élasticité est altérée, ou le corps déformé d'une manière permanente. Ainsi, par exemple, pour les bois, il paraît certain que le raccourcissement déterminé par des forces exté-

rieures agissant parallèlement aux fibres et de manière à les comprimer, est plus grand que l'allongement déterminé par des forces égales agissant dans le sens des fibres de manière à produire une extension, bien que les forces dont il s'agit soient assez petites pour ne pas produire une déformation permanente, soit par compression, soit par extension. Au contraire, pour le fer forgé, les variations de longueur d'un prisme tiré ou comprimé dans le sens de sa longueur, sont sensiblement égales pour des forces égales de traction ou de compression, jusqu'aux charges et même au delà des charges qui donnent lieu à une déformation permanente.

Résistance élastique. Coefficient d'élasticité. — Le principe de la proportionnalité des forces développées aux variations de distance des particules étant admis, il est évident que l'allongement ou le raccourcissement total d'un prisme homogène sollicité par une force donnée de traction ou de compression, agissant dans le sens de sa longueur et perpendiculairement à sa base où à sa section transversale, sera proportionnel à la longueur totale du prisme, et en raison inverse de l'aire de sa section transversale ou de sa base. Ainsi, si un prisme d'une longueur de L mètres, et dont la section est de A mètres carrés, s'allonge ou se raccourcit d'une longueur l, sous une charge de P kilogrammes, on en conclura qu'un prisme de même matière, ayant un mètre de longueur et un mètre carré de section transversale, s'allongera ou se raccourcira d'une longueur égale à $l \times \frac{1}{L} \times \frac{A}{1} \times \frac{1}{P} = \frac{Al}{LP}$ pour chaque kilogramme de charge. L'allongement ou le raccourcissement par kilogramme de charge est évidemment d'autant moindre, que la résistance élastique du corps est plus considérable ; par conséquent si l'on appelle α l'allongement sous une charge de 1 kilogramme d'un corps prismatique dont la longueur serait égale à l'unité linéaire et la section égale à l'unité superficielle, le rapport $\frac{1}{\alpha}$ pourra être pris pour la mesure de la résistance élastique du corps. Ce rapport varie d'un corps à l'autre, et est appelé le module, ou le coefficient d'élasticité du corps. On a d'après ce qui précède, pour un solide donné:

$$\alpha = \frac{Al}{LP},$$

et en désignant par E le coefficient d'élasticité de ce corps :

$$E = \frac{1}{\alpha} = \frac{LP}{Al}. \qquad (m)$$

Remarquons que si dans cette dernière équation, on suppose $l = L$ et $A = 1$, on a $E = P$, c'est-à-dire que le coefficient d'élasticité d'un corps serait égal au poids dont il faudrait charger un prisme ayant pour section l'unité superficielle, pour l'allonger ou le raccourcir d'une longueur égale à sa longueur primitive, si une pareille déformation était possible sans rompre le corps, ni altérer son élasticité. C'est ordinairement de cette manière qu'on définit le coefficient d'élasticité des corps : il nous a semblé qu'on se ferait une idée plus nette de la signification de ce nombre caractéristique de l'élasticité de chaque corps, en disant que c'est le nombre par lequel il faut diviser l'unité pour obtenir la fraction de sa longueur primitive dont s'allonge ou se raccourcit un solide prismatique dont la section est l'unité superficielle, pour chaque kilogramme de charge; on a en effet $\alpha = \frac{1}{E}$.

Roideur des corps. — La résistance qu'un corps oppose aux forces qui tendent à le déformer, est ce qu'on entend habituellement par la *roideur* de ce corps. La roideur dépend à la fois de l'élasticité et des dimensions. En effet, en comparant entre eux des solides prismatiques tirés ou pressés parallèlement à leur axe, leurs *roideurs* seront inversement proportionnelles aux allongements respectifs qu'ils prendront sous une même charge, égale à l'unité de poids; par exemple, l étant l'allongement total d'un solide prismatique pour une charge d'un kilogramme, $\frac{1}{l}$ sera la mesure de la roideur de ce prisme. Or, en supposant $P = 1$ dans l'équation (m), on en tire :

$$\frac{1}{l} = \frac{AE}{L}.$$

La roideur d'un solide prismatique est donc proportionnelle au module d'élasticité, à sa section transversale, et en raison inverse de sa longueur.

Résistance à la rupture. — Un solide prismatique tiré ou comprimé dans le sens de sa longueur subit une déformation permanente, sous des charges inférieures à celles qui occasionnent sa rupture immédiate. Ainsi, l'on doit distinguer la résistance à la rupture, de la ré-

sistance élastique des solides; la première a pour mesure la charge nécessaire pour occasionner la rupture du corps. On conçoit que pour un solide prismatique tiré ou comprimé dans le sens de son axe, la résistance à la rupture doit être proportionnelle à la section transversale du solide, et qu'en conséquence, si l'on désigne par R le poids capable de rompre un prisme dont la section transversale est égale à l'unité superficielle, le poids nécessaire pour rompre un prisme dont la section est égale à A, sera égal à A × R. Cette proportionnalité des forces nécessaires pour déterminer la rupture aux sections transversales des prismes tirés ou comprimés dans le sens de leur longueur, est en effet confirmée par des expériences directes. Seulement pour un solide de nature déterminée, le nombre R peut avoir des valeurs très-différentes, suivant qu'il se rapporte à la rupture produite par extension, ou à la rupture produite par compression. Le bois, la fonte, les pierres, nous offriront des exemples bien tranchés de cette différence.

Parmi les matériaux employés dans les constructions, il faut distinguer ceux qui sont composés de particules disposées toutes de la même manière les unes par rapport aux autres, tels que la fonte de fer, le laiton, et en général les corps fondus et refroidis en masse sans aucun indice de cristallisation, et ceux qui sont composés de particules, qui sont elles-mêmes groupées entre elles d'une manière particulière, comme les bois qui sont composés de couches concentriques, lesquelles sont elles-mêmes une agrégation de fibres longitudinales, les fers, et surtout les fers laminés qui sont composés de lames ou de fibres bien distinctes, moins adhérentes les unes aux autres, qu'elles ne sont adhérentes à elles-mêmes, les corps fondus refroidis très-rapidement et dont l'enveloppe extérieure est *trempée*, les corps composés de cristaux. Pour les corps du premier genre, le fer fondu, le laiton, la résistance élastique et la résistance à la rupture sont les mêmes dans tous les sens; mais pour les corps fibreux, lamelleux ou cristallisés, ces résistances varient suivant que les forces agissent dans le sens des fibres, ou dans le plan des lames, ou suivant une direction perpendiculaire aux fibres ou aux lames.

Résistance des pierres, briques et mortiers, à l'écrasement.

Les pierres et les briques supportent ordinairement, dans les constructions, des efforts qui tendent à les écraser ou à les détacher les

unes des autres, soit par un mouvement perpendiculaire aux faces de contact, par arrachement, soit par un mouvement parallèle à ces faces, par glissement. Les mortiers, qui lient entre eux les pierres ou briques, sont soumis aux mêmes efforts de compression et de rupture par arrachement, ou glissement. Les expériences que l'on possède sur la résistance des pierres à l'écrasement, sont dues principalement à Gauthey, Rondelet, MM. Rennie et Vicat.

On déduit des observations faites par les trois premiers expérimentateurs, que les qualités physiques des pierres, telles que la dureté, la pesanteur spécifique, la couleur, ne peuvent faire apprécier la résistance, qui ne peut être déterminée que par des expériences spéciales; mais que pour des pierres de même nature, les parties les plus dures sont aussi les plus résistantes. Pour les échantillons pris dans un même banc de pierre, ceux qui sont au milieu du banc sont plus résistants que ceux qui sont pris dans le voisinage des surfaces extérieures. La résistance à l'écrasement est sensiblement proportionnelle à l'aire des sections transversales, pour des prismes semblables; mais elle varie avec la forme de la base et la hauteur des prismes. Elle est la plus grande possible pour les prismes à base circulaire ou carrée; et quand on fait varier la hauteur du prisme, elle atteint son maximum lorsque la hauteur est égale au diamètre ou à la largeur de la base. Ainsi, le cube serait la forme la plus résistante : les prismes aplatis ou allongés résisteraient moins à la rupture. Toutefois, ce dernier résultat est contredit par M. Vicat, qui a trouvé que des prismes à base carrée de 1 à 2 centimètres de côté, offraient une plus grande résistance quand ils étaient réduits à l'état de dalles minces, que quand ils présentaient la forme cubique. Les faces d'appui des prismes de M. Vicat, étaient parfaitement dégauchies, sans aucun porte-à-faux, et garnies de lames de carton, pour que les pressions fussent uniformément réparties, circonstances qui ne peuvent guère se trouver réunies dans les constructions en grand, ainsi que l'observe M. Poncelet (*Mécanique industrielle*, p. 306).

Digitized by Google

Voici les résultats principaux des expériences de divers auteurs sur la résistance à l'écrasement (1).

INDICATION des MATÉRIAUX SOUMIS à L'ÉCRASEMENT.	POIDS du mètre cube en kilogr.	CHARGE par cent. carré qui produit l'écrasement.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
Basalte de Suède. . . .	3060	1912	Rondelet.
— d'Auvergne. . .	2880	2077	*Id.*
Lave du Vésuve, dite piperno, près Pouzzol. .	1970	592	*Id.*
Lave tendre de Naples. .	1720	160	*Id.*
Scorie de volcan. . . .	860	33	*Id.*
Porphyre.	2870	2472	Gauthey.
Granit vert des Vosges. .	2850	619	Rondelet.
— gris de Bretagne. .	2740	654	*Id.*
— de Normandie, dit *gatmos*. . .	2660	702	*Id.*
— gris des Vosges. .	2640	423	*Id.*
— bleu d'Aberdeen en Écosse. . . .	2625	775	G. Rennie.
— de Cornwall. . .	2662	451	*Id.*
Grès très-dur roussâtre. .	2520	813	Rondelet.
— blanc.	2480	923	*Id.*
— tendre.	2490	4	*Id.*
Pierre porc-puante. . .	2660	681	*Id.*
Pierre grise de Florence à grain fin.	2560	422	*Id.*
Pierre siliceuse de Dundee	2530	462	G. Rennie.
Grit de Derby, pierre siliceuse rouge et friable. .	2316	219	*Id.*
Marbre noir de Flandres.	2720	789	Rondelet.
— blanc veiné. . .	2700	298	*Id.*
— blanc statuaire. .	2690	327	*Id.*
Pierre calcaire noire de St-Fortunat, employée à Lyon, très-dure et coquilleuse.	2650	627	*Id.*
Liais de Bagneux, près Paris, très-dur.	2440	444	*Id.*
Roche de Châtillon, près Paris, dure et un peu coquilleuse.	2290	164	*Id.*

(1) Les résultats contenus dans ces tableaux sont empruntés principalement aux *Leçons de M. Navier*, et à la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet.

INDICATION des MATÉRIAUX SOUMIS à L'ÉCRASEMENT.	POIDS du mètre cube en kilogr.	CHARGE par cent. carré qui produit la rupture.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
Pierre à plâtre de Montmartre.	1920	71	Gauthey.
Calcaire dur de Givry. .	2360	310	*Id.*
— tendre.	2070	120	*Id.*
— jaune oolitique de Jaumont, près Metz, 1re qualité.	2200	180	Montfort.
2e qualité.	2000	120	*Id.*
Roche vive de Saulny, près Metz (non rompue).	2550	300	*Id.*
Calcaire bleu à gryphites donnant la chaux hydraulique de Metz. . .	2600	300	*Id.*
Brique dure	1560	149	Gauthey.
Brique de Stourbridge. .	»	120	G. Rennie.
— de Hammersmith..	»	70	*Id.*
Brique rouge.	2168	56	*Id.*
— rouge pâle. . . .	2085	39	*Id.*
— brûlée.	»	100	*Id.*
Plâtre gâché à l'eau. . .	»	50	Rondelet.
Id. au lait de chaux.	»	73	*Id.*
Mortier ordinaire en chaux et sable.	1600	35	*Id.* Moyenne de plusieurs essais sur du mortier battu et non battu.
Mortier de chaux et tuile aux pilés.	1460	47	Rondelet
Le même battu. . . .	1660	65	*Id.*
Mortier en grès pilé. . .	1680	30	Rondelet. Ces expériences ont été faites sur des mortiers 18 mois après leur fabrication. Quinze ans après elles ont été répétées, et l'on a trouvé une augmentation de résistance d'environ 1/8 pour les mortiers de chaux et sable, et de 1/4 pour les mortiers de ciment et de pouzzolane.
Mortier de pouzzolane de Rome et de Naples mêlées.	1460	37	
Le même battu.	1680	53	
Enduit d'une conserve antique des environs de Rome.	1550	76	Rondelet.
Enduit en ciment (chaux et tuileau) des démolitions de la bastille . .	1490	55	*Id.*
Plâtre ordinaire gâché ferme.	»	90	Vicat.
Id. moins ferme. . . .	»	42	*Id.*
Mortier en chaux et sable ordinaire âgé de 14 ans.	»	19	*Id.*
Id. en chaux hydraulique ordinaire.	»	74	*Id.*
Id. en chaux éminemment hydraulique.	»	144	*Id.*

Digitized by Google

M. Mary m'a communiqué les expériences suivantes faites à l'atelier de Chaillot.

Un cube de grès de Nemours, de 5 centimètres de côté, a été soumis à des charges croissantes, par l'intermédiaire d'un levier en fer.

La charge sur le cube résultante du poids de l'appareil seul, était de 2139^k,45.

Le cube a supporté sans altération une charge de 3939^k,45, ou 157^k,58 par centimètre carré de base.

Une charge additionnelle de 20 kilogrammes à l'extrémité du levier, produisant une charge additionnelle directe de 600 kilogrammes sur le cube, a déterminé une fente. La charge sur le cube était alors de 181^k,58 par centimètre carré.

Une nouvelle charge additionnelle de 20 kilogrammes à l'extrémité du levier, n'a point augmenté la fente. La charge directe était alors de 205$_k$,58 par centimètre carré.

Une charge additionnelle de 10 kilogrammes à l'extrémité du levier, équivalente à une augmentation de 12 kilogrammes par centimètre carré de la base du cube, a déterminé une seconde fente. La charge était alors de 217^k,58 par centimètre carré.

En ajoutant des charges de 10 kilogrammes à la fois, à l'extrémité du levier, dont chacune augmentait de 12 kilogrammes la charge directe sur le cube par centimètre carré, une troisième fissure a été déterminée sous la charge de 253^k,58 par centimètre carré; la charge a été poussée ensuite successivement jusqu'à 349$_k$,58 sans que le cube de grès, qui était fissuré, fût écrasé.

Un paralléiipipède en grès de Nemours, dont la base avait 10 centimètres sur 5, et dont la hauteur était de 5 centimètres, a supporté sans aucune altération une charge de 186^k,79 par centimètre carré; la puissance de l'appareil n'a pas permis de porter la charge plus loin.

Un cube de roche calcaire d'Arcueil, d'un banc dur et coquillier, de 5 centimètres de côté, a supporté sans altération une charge de 133^k,58 par centimètre carré de sa base. Il a été brisé par une charge de 157^k,58; enfin, il a été réduit en poussière par une charge de 181^k,58 par centimètre carré.

Un cube de même dimension, en roche d'Arcueil, prise dans un banc tendre, moins coquillier et plus compacte que le précédent, a supporté sans altération 85^k,58 par centimètre carré; il s'est fendu sous une charge de 109^k,58 et a été réduit en poussière sous la charge de 115^k,58.

Un parallélipipède de roche d'Arcueil, du banc dur et coquillier, ayant de base 10 centimètres sur 5, et 5 centimètres de hauteur, a été

Digitized by Google

fendu par une charge de 54ᵏ,79 par centimètre carré, et réduit en poussière par une charge de 78ᵏ,79. Il est probable que le plan d'assise du parallélipipède mis en expérience n'était pas bien dressé, et qu'un porte-à-faux aura déterminé la rupture.

Les matériaux qui entrent dans les constructions en maçonnerie, sont rarement exposés à des efforts tendant à produire la rupture par extension : mais ils supportent des efforts qui tendent à les séparer, en les faisant glisser les uns sur les autres. Les constructions résistent à ces derniers, soit par la force du frottement, soit par la cohésion des ciments et mortiers, ou par leur adhésion pour les pierres ou briques. Les expériences que nous possédons sur la résistance à la rupture des matériaux par extension et sur la résistance due au frottement, à la cohésion et à l'adhésion des mortiers et ciments, sont dues à Coulomb, Tredgold, Rondelet, Boistard, M. Vicat et M. Morin. Voici les résultats principaux de ces expériences :

Digitized by Google

Résistance à la rupture par extension.

INDICATION des SUBSTANCES.	EFFORTS produisant la rupture par centimètre carré.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
	kil.	
Pierre blanche d'un grain fin et homogène	14,40	Coulomb.
Brique de Provence très-bien cuite et d'un grain très-fin.	18,70 à 20	*Id.*
Calcaire de Portland. . . .	60,20	Tredgold.
Brique anglaise.	19,30	*Id.*
Plâtre.	4,00	Rondelet.
(La force avec laquelle le plâtre adhère aux pierres et aux briques, est environ les 2/3 de la précédente ; elle est plus grande pour la pierre meulière et la brique que pour les pierres calcaires. Elle diminue beaucoup avec le temps.)		
Mortier. Environ le huitième de la résistance à l'écrasement.	»	*Id.*
(La force d'adhésion pour les pierres et briques surpasse la force de cohésion.)		
Mortiers bien faits à sable quartzeux et chaux éminemment hydraulique . . .	9,60	Vicat.
Mortiers bien faits, à sable quartzeux et chaux hydraulique ordinaire.	6,00	*Id.*
Mortiers bien faits, à sable quartzeux et chaux communes, moyennes ou grasses.	3,00	*Id.*
Mortiers mal faits, communément au plus.	1,50	*Id.*
Ciment de Pouilly et sable (parties égales), après un an de durcissement dans l'air ou dans l'eau.	9,60	*Id.*
Plâtre gâché ferme. . . .	11,70	*Id.*
— gâché moins ferme que le précédent. . . .	5,80	*Id.*
— gâché à la manière ordinaire.	4,00	*Id.*

Résistance due au frottement et proportionnelle à la pression, mesurée par la force nécessaire pour déterminer le glissement, après un certain temps de repos.

INDICATION des SUBSTANCES.	RAPPORT du frottement à la pression.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
Calcaire tendre, bien dressé sur calcaire tendre. . .	0,74	Morin.
Calcaire dur, bien dressé sur calcaire dur.	0,70	*Id.*
Brique ordinaire sur calcaire dur ou tendre.	0,67	*Id.*
Calcaire tendre, sur calcaire tendre avec mortier frais en sable fin.	0,74	*Id.*
Grès uni sur grès uni à sec. .	0,71	Rennie.
Grès uni sur grès avec enduit de mortier frais. . . .	0,66	*Id.*
Calcaire dur poli sur calcaire dur poli.	0,58	Rondelet.
Calcaire bouchardé sur calcaire bouchardé	0,78	Boistard.
Granit bien dressé sur granit à sec.	0,66	Rennie.
Granit avec mortier frais sur granit bouchardé. . . .	0,49	*Id.*

Digitized by Google

Résistance due à l'adhésion ou à la cohésion, proportionnelle à l'étendue des surfaces de contact, et mesurée par la force nécessaire pour détacher parallèlement aux surfaces de contact des corps avec mortier ou ciment interposés.

NATURE DES PIERRES ET DES ENDUITS.	Jours	FORCE par centimètre carré.	NOMS DES EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
		kil.	
Calcaire bouchardé sur calcaire bouchardé, avec mortier en chaux grasse et sable fin, après 17 jours de contact à l'air.		0,66	Boistard. L'étendue des surfaces est de 1 à 2 déc. carrés.
Idem.		0,94	Boistard. L'étendue des surfaces est de 3 à 5 déc. carrés.
Idem, après 48 jours de contact dans l'eau. . .		0,12	Boistard. Surface de 47 décimètres carrés.
Calcaire bouchardé sur calcaire bouchardé, avec chaux grasse et ciment, après 17 jours de contact à l'air. .		0,32	Boistard. Surface de contact 1 à 2 décim. carrés.
Idem.		0,53	Boistard. Surface de contact de 3 à 5 décim. carrés.
Idem, non rompu, après 48 jours de contact dans l'eau.		0,11	Boistard. Surface de 47 décimètres carrés.
Calcaire tendre de Jaumont fiché sur le même, avec mortier en chaux hydraulique de Metz et sable fin, après un contact dans l'air de. . .	j. 83	1,80	Morin. Surface, 1 à 2 déc. car.
	48	1,20	*Id.* — 2 3
	43	1,01	*Id.* — 2 5
	48	1,00	*Id.* — 4 6
	48	0,94	*Id.* — 7 8
Briques ordinaires, fichées à ce même mortier après un contact dans l'air de 48 jours.		1,40	*Id.* — 1 3
		1,00	*Id.* — 2 6
Calcaire de Jaumont sur calcaire de Jaumont, avec plâtre ordinaire et contact dans l'air.		2,20	*Id.* Surface de contact, 2 décimètres carrés.
		2,80	Morin. Surface, 8 déc. car.
Calcaire bleu à gryphite, avec plâtre après 48 jours de contact.		1,10	*Id.* — 2,5
		2,00	*Id.* — 4,5

Observations sur les résultats consignés dans les tableaux précédents.

Les résultats consignés dans les tableaux précédents ne doivent être employés que pour déterminer des limites en dessous desquelles il faut se tenir de beaucoup dans les constructions, à cause des imperfections inévitables dans le dressage et la pose, qui font que les matériaux ne s'appuient pas à beaucoup près également sur l'étendue totale des surfaces de contact ; et ensuite, parce que les expériences n'ayant déterminé que les charges capables de produire la rupture ou la dislocation immédiate des matériaux ou constructions, il est certain que des charges beaucoup moindres et permanentes, suffiraient pour la déterminer, au bout d'un temps plus ou moins long. Ainsi, ces résultats expriment plutôt des rapports entre les forces de résistance des divers matériaux, que des nombres absolus ; ils peuvent être très-utiles, surtout si l'on a soin de les comparer aux charges réellement supportées par les matériaux dans les constructions du même genre que celles qu'on se propose d'exécuter, qui déjà ont résisté aux épreuves du temps. D'après les architectes les plus expérimentés, on ne doit pas faire supporter aux pierres une charge supérieure à $\frac{1}{10}$ de celle qui déterminerait la rupture immédiate dans les expériences en petit, et l'on doit même se tenir au-dessous de cette limite, et ne pas dépasser $\frac{1}{15}$ ou même $\frac{1}{20}$, si les pierres ne sont pas parfaitement taillées et posées avec le plus grand soin. Rondelet cite comme une des constructions les plus hardies, les colonnes de l'église de Toussaint d'Angers, qui supportent une charge de $44^k,28$ par centimètre carré, et qui sont construites avec une pierre calcaire d'un gris roussâtre, coquillière et très-dure, dont la résistance à la rupture, mesurée sur un cube de 5 centimètres de côté, a été trouvée de $437^k,6$ par centimètre carré.

Quant aux résistances au glissement qui proviennent, soit du frottement, soit de la cohésion des mortiers ou ciments, ou de leur adhésion pour les pierres et briques, les expériences que nous possédons sont encore trop peu nombreuses, leurs résultats trop peu concordants, et la nature des matériaux et des mortiers trop variable pour admettre les chiffres que nous avons rapportés comme pouvant servir de base à des projets de constructions. Ces expériences sont néanmoins très-précieuses, parce qu'elles posent des limites en dessous desquelles il faut se tenir, et qu'elles nous permettent d'apprécier d'une manière encore bien incertaine, ce qui vaut pourtant mieux qu'un vague com-

plet, l'excès de solidité que l'on donnera à des constructious soumises à des efforts d'une grandeur déterminée.

Nous aurons soin, en traitant des revêtements en maçonnerie, de montrer par des exemples, le parti que l'on peut en tirer.

Résistance des bois à l'écrasement et à l'extension.

Le tableau suivant contient les résultats des principales expériences sur la résistance des bois à l'écrasement :

INDICATION des SUBSTANCES.	POIDS produisant l'écrasement par cent. carré.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
	kil.	
Chêne.	385 à 465	D'après Rondelet, ces résultats se rapportent à des pièces de forme cubique. Rondelet ajoute que la résistance ne diminue pas sensiblement, pour des prismes dont la hauteur ne dépasse pas sept à huit fois l'épaisseur et qui ne peuvent pas plier.
Sapin.	462 à 538	Rondelet. Même observation.
Chêne anglais.	271	Rennie. Les expériences ont été faites sur des cubes d'un pouce anglais de côté.
Sapin blanc.	135	*Id.*
Pin d'Amérique.	118	
Orme.	90	*Id.*

D'après Gauthey, la pression qu'on doit faire supporter à la surface d'une pièce de chêne ne doit pas dépasser 160 kilogrammes, et 200 kilogrammes par centimètre carré, suivant que la pièce est chargée sur une surface parallèle ou perpendiculaire aux fibres du bois.

D'après Tredgold, la charge sur une surface parallèle aux fibres ne doit pas dépasser 108 kilogrammes par centimètre carré pour le chêne, et 70 kilogrammes pour le sapin jaune.

Nous n'avons pas de résultats d'expériences directes sur la contraction qu'éprouvent les bois soumis à des efforts de pression.

Le tableau suivant renferme les résultats d'expériences sur la résistance des bois à la rupture par extension.

INDICATION des SUBSTANCES.		POIDS produisant la rupture par cent. carré.	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS et OBSERVATIONS.
		kil.	
Chêne tiré dans le sens des fibres.		981	Rondelet.
Chêne	*Id.* . . .	646	Barlow.
Id.	*Id.* . . .	814	*Id.*
Sapin tiré dans le sens des fibres.		904	*Id.*
Id.	*Id.* . . .	812	*Id.*
Hêtre	*Id.* . . .	806	*Id.*
Teak	*Id.* . . .	1061	*Id.*
Frêne	*Id.* . . .	1210	*Id.*
Id.	*Id.* . . .	1191	*Id.*
Chêne tiré perpendiculairement aux fibres. . . .		163	Tredgold.
Peuplier	*Id.* . . .	125	*Id.*
Larix	*Id.* . . .	68 à 120	*Id.*

Les bois soumis à des charges permanentes, qui tendent à les rompre par écrasement, ne doivent pas être soumis, suivant M. Navier, à des charges permanentes supérieures à 1/5 de celles qui occasionneraient l'écrasement. Ainsi Perronet prescrit de ne pas charger de plus de 25,000 et 50,000 kilogrammes les pieux en chêne de $0^m,25$ et $0^m,32$ de diamètre, qui présentent des surfaces de 487,5 et 799 centimètres carrés. Cette prescription correspond à une charge de 51 kilogrammes par centimètre carré pour les pieux de $0^m,25$, et de 62 kilogrammes pour ceux de $0^m,32$. Ces nombres sont à peu près 1/5 de la résistance du chêne à l'écrasement, telle qu'elle est donnée dans le premier tableau ci-dessus par M. Rennie, et le huitième environ de la résistance assignée au chêne par Rondelet. Quelques auteurs conseillent même de ne pas porter les charges permanentes au delà de 1/10 de celles qui, d'après les expériences, produisent l'écrasement.

Cette dernière règle nous paraît devoir être adoptée toutes les fois que les supports en bois sont libres, et ne sont point maintenus latéralement par des obstacies qui s'opposent à la fois à la flexion transversale et aussi à l'écrasement des fibres. Pour les pieux enfoncés dans le terrain, on peut sans crainte calculer la charge, d'après la règle admise par Perronnet.

Digitized by Google

Quant aux bois exposés à des efforts qui tendent à les rompre par extension, nous possédons quelques expériences qui permettent d'assigner les charges qui produisent un allongement permanent, et qui peuvent être regardées comme les limites que l'on ne doit pas dépasser. Dans une expérience de MM. Minard et Desormes, un prisme de chêne de $0^m,036$ d'équarrissage et $1^m,016$ de longueur a subi les allongements suivants :

Charges successives : 0^k, 1708^k, 0^k, 2411^k, 0^k, 3114, 0^k.
Allongements totaux : 0, $0^m,001$, 0, $0^m,0015$ 0, $0^m,00175$, 0,00025.

Ainsi, pour les deux premières charges correspondantes à $131^k,8$ et 186 kilogrammes par centimètre carré, les allongements ont été sensiblement proportionnels aux efforts de tension, et n'ont point persisté, après que la charge a été enlevée. On a pour l'allongement α qui correspond à la charge de $131^k,8$ par centimètre carré,

$$\alpha = \frac{\overline{0,036}^2 \times 0,001}{1,016 \times 1708} = 0,0000000007468,$$

et le coefficient d'élasticité :

$$E = \frac{1}{\alpha} = 1339000000.$$

Une expérience de M. Ardant, capitaine du génie, rapportée par M. Poncelet (*Mécanique industrielle*, p. 320), donne pour le coefficient d'élasticité du chêne E = 1,178,000,000, nombre un peu plus petit, mais qui ne diffère pas beaucoup du précédent.

La limite à laquelle les fibres du chêne subissent un allongement permanent serait, d'après les expériences de MM. Minard et Desormes, comprise entre 186 et 240 kilogrammes par centimètre carré, égale au tiers ou au quart de celle qui occasionnerait la rupture immédiate d'après les expériences de Rondelet et Barlow. Ce résultat est conforme à celui des expériences de M. Ardant. Il convient de ne pas soumettre les bois à une charge supérieure au tiers de celle qui serait capable d'altérer l'élasticité. En conséquence de ce principe, nous fixerons à 60 ou 80 kilogrammes au plus par centimètre carré la charge maximum que l'on puisse faire supporter au bois de chêne tiré dans le sens des fibres, et cette charge maximum de 80 kilogrammes par

Digitized by Google

centimètre carré produira un allongement égal à une fraction de la longueur primitive donnée par la formule :

$$\frac{l}{L}=\frac{P}{AE}=\frac{80}{1200000000 \times 0,0001}=\frac{8}{12000}=0,00067,$$

qui n'est pas la moitié de celui obtenu dans la seconde expérience de MM. Minard et Désormes, après laquelle le bois déchargé a repris sa longueur primitive.

M. Ardant a fait également sur des tringles de sapin des expériences qui conduisent aux résultats suivants (*Mécanique industrielle*, de M. Poncelet).

La moyenne de deux séries d'expériences sur le sapin blanc conduit à la valeur du coefficient d'élasticité :

$$E = 1400000000.$$

M. Poncelet admet, d'après les résultats comparés des expériences directes de M. Ardant et de celles de plusieurs auteurs, sur la flexion de sapins de diverses espèces, dont il sera parlé plus tard, pour le coefficient d'élasticité moyen du sapin :

$$E = 1,300.000.000.$$

Et pour le pin ou le sapin rouge, la valeur un peu plus forte :

$$E = 1,500.000.000.$$

La limite des allongements passé laquelle l'élasticité est altérée s'élèverait, d'après les auteurs anglais, à $0^m,002$ de la longueur primitive pour le sapin blanc, et à 0,0021 pour le pin. Ces allongements correspondraient respectivement, en partant des valeurs données cidessus pour le nombre E, à des charges égales à :

$$P = AE\frac{l}{L} = 0,0001 \times 1,300.000.000. \times 0,002 = 260 \text{ kilogr.}$$

$$P = AE\frac{l}{L} = 0,0001 \times 1,500.000.000 \times 0,0021 = 315 \text{ kilogr.}$$

par centimètre carré pour le sapin blanc et le pin.

D'après M. Ardant, l'élasticité serait déjà altérée pour un allonge-

ment de 0,00117 de la longueur primitive pour le sapin blanc, auquel correspond, d'après les expériences du même auteur, une charge de 185 kilogrammes par centimètre carré.

En admettant ce dernier résultat, si l'on veut prendre pour limite des charges permanentes à faire supporter aux fibres du bois, dans les constructions, le tiers de celles qui détermineraient un allongement permanent, ainsi que le conseillent les auteurs les plus expérimentés, on est conduit à fixer la limite des charges à 61 kilogrammes par centimètre carré pour le sapin blanc. Cette limite serait, d'après les expériences des auteurs anglais, et en se bornant toujours au tiers de la charge qui occasionnerait un allongement permanent, de 80 kilogrammes pour le sapin blanc, et de 105 kilogrammes pour le pin ou sapin rouge par centimètre carré. Les allongements correspondants à ces dernières charges seraient respectivement, en adoptant les valeurs E = 1,300,000,000 pour le sapin blanc, et E = 1,500,000,000 pour le pin, 0,00067 et 0,0007 de la longueur primitive.

De la fonte de fer soumise à la compression ou à l'extension.

Nous empruntons à la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet le tableau suivant des résultats moyens des expériences de Rondelet, Reynolds, Rennie et Karsten, sur la résistance de la fonte de fer à l'écrasement. Les expériences ont été faites sur des cubes de 6 à 7 centimètres de côté.

			Poids qui produit l'écrasement par millimètre carré. kil.
Fonte grise et douce obtenue au coke, tirée de l'intérieur d'une barre et limée; cette fonte s'aplatit brusquement sans se réduire en poussière ni en fragments. . . .	de 1re fusion au haut fourneau.	coulée horizontalement.	109
		coulée debout . . .	102
	de 2e fusion au cubilot . . .	coulée horizontalement.	99
		coulée debout. . . .	98
	2e fusion au four à réverbère. .	coulée horizontalement.	118
		coulée debout. . . .	124
Même fonte coulée en petite masse, devenue dure et blanche par le refroidissement, se réduisant en poussière avec explosion et lumière	1re fusion, coulée debout.		150
	2e fusion au cubilot.		125
	3e fusion au four à réverbère.		180
Fonte de fer pour canons.			250

La fonte de fer blanche et dure, trempée par un refroidissement rapide, résiste, comme on voit, beaucoup plus à l'écrasement que

la fonte grise et douce; mais elle est aigre, et susceptible de casser par le choc.

Il n'existe pas d'expériences directes sur la quantité dont la fonte se comprime sous une charge donnée qui n'altérerait pas son élasticité.

Des pièces de fonte de forme cubique peuvent être chargées, dans les constructions, d'un poids égal au quart ou au cinquième de celui qui produirait l'écrasement; environ 20 à 25 kilogrammes par millimètre carré de surface.

Cette charge doit être réduite, d'après M. G. Rennie, aux 2/3 à la moitié, ou même à 1/15 de sa valeur, quand la hauteur des pièces chargées est respectivement égale à 4, 8 ou 36 fois le côté de la section transversale, que nous supposons carrée ou cylindrique.

De la résistance de la fonte à l'extension.

Dans des expériences faites à l'usine à fer de Sayn, près Coblentz, des barreaux de fonte grise du Rhin, de 3 pouces de diamètre, furent limés dans leur milieu jusqu'à ce que le diamètre fût réduit, dans cette partie, à 2 pouces 1/2. Douze barreaux furent rompus; et en mettant de côté une seule expérience faite sur un barreau défectueux, on trouve que la rupture fut déterminée par une traction de 94,355 livres, poids de Cologne, ou 19,227 livres par pouce carré de section. La fonte était grise, douce, provenant de la fusion d'un minéral de fer oxydé-hydraté, au charbon de bois. Traduites en mesures françaises, ces expériences assignent à la fonte une résistance à la rupture par extension de 13kil.,34 par millimètre carré.

Ces résultats s'accordent sensiblement avec ceux des expériences faites par le capitaine Brown et M. G. Rennie.

L'allongement de la fonte de fer, sous des charges inférieures ou égales à celles qui déterminent la rupture, n'a point été observé directement.

On voit que la résistance de la fonte à la rupture par extension est beaucoup moindre que sa résistance à l'écrasement: elle n'en est guère que la dixième partie. Ces résultats sont confirmés, comme nous le verrons, par les observations faites sur la rupture de prismes en fonte posés sur des appuis, et chargés perpendiculairement à la longueur des pièces. Aussi la fonte, dans les constructions, est-elle généralement employée uniquement comme support, et rarement soumise à des efforts directs de traction. On se rappellera que les bois présentent un résultat tout à fait inverse.

Du fer forgé et de quelques autres métaux.

Le fer forgé n'est guère employé comme support. D'après les expériences de Rondelet, un cube en fer forgé de 6 à 12 lignes de côté, commence à se comprimer sous une pression moyenne de 49k,45 par millimètre carré. Lorsque la hauteur est triple de la largeur, le fer se plie plutôt que de s'écraser.

M. Pictet a trouvé qu'un barreau de fer rond de 11 lignes de diamètre, chargé d'un poids de 65 livres tendant à rapprocher ses extrémités, se raccourcissait de $\frac{5}{1000000}$ de sa longueur primitive, ce qui correspond à un raccourcissement de $\frac{76}{1000000}$ pour une charge d'un kilogramme par millimètre carré, et conduirait à la valeur du module d'élasticité :

$$E = \frac{1}{0,000000000076} = 13.158.000.000.$$

M. Pictet a en outre observé que le fer déchargé n'avait pas repris complètement sa longueur primitive.

Nous possédons un grand nombre d'expériences sur la résistance du fer à la rupture par extension, et sur la loi de l'allongement des fibres avec les forces de traction.

La résistance absolue à la rupture, et la loi des allongements sont très-différentes, suivant que le fer a été écroui par le laminage, le martelage ou le passage à la filière, qu'il a été refroidi rapidement après l'écrouissage et le forgeage, ou recuit, et aussi suivant la qualité, le mode de travail, les dimensions de l'échantillon. Aussi les résultats d'expériences qui sont assez uniformes pour des fers de même échantillon, obtenus par des procédés de fabrication semblables, sont-ils très-divergents pour les fers en barre d'échantillons divers et de diverses provenances. Un fait général, c'est que le recuit augmente considérablement la ductilité, et diminue en même temps la résistance à la rupture.

Nous rapporterons d'abord dans le tableau suivant les principaux résultats d'expériences sur la résistance à la rupture du fer en barres de gros échantillons, du fer et du cuivre laminés.

DIMENSIONS DES FERS.	INDICATIONS du mode de fabrication et de la provenance.	CHARGE produisant la rupture.	CHARGE par millimètre carré.	NOMS des expérimentateurs ET OBSERVATIONS.
			kilog.	
8 mil. sur 16. .	Étirée sous les cylindres dans les forges de St-Chamond.	»	43,84	Séguin aîné. (Moyennement: 47,83 par millim. carré.
8 — 10. . . .	*Id.*	»	51,66	
Rond de 10 mil. de diamètre .	*Id.*	»	48,00	
13 mil. sur 13 .	*Id.*	»	30,45	Séguin aîné.
10 mill, 1—10,1.	Une barre de 13,5 sur 13,5, coupée dans son milieu, soudée en sifflet et étirée sous le marteau jusqu'à ce qu'elle fût réduite aux dimensions indiquées, refroidie sans recuit.	5688	55,20	*Id.* Cette barre s'est allongée de $\frac{49}{660}$ de sa longueur primitive, sous un poids de 5580 kil. avant de rompre sous la charge de 5688.
4,5 — 4,5 .	La même barre chauffée un peu au-dessus du rouge cerise, étirée en cinq chaudes successives, et ramenée aux dimensions indiquées, refroidie sans recuit.	»	61,00	*Id.* L'allongement qui a précédé la rupture n'a pu être mesuré.
13,5 — 13,5 .	La même barre, chauffée au rouge blanc soudant, refroidie ensuite très-lentement.	»	29,70	Séguin aîné.
Une bande de fer ruban de 20 mil. de large sur 1,7 d'épaisseur. . .	. . . .	»	44,70	*Id.*
Tôle laminée, tirée dans le sens du laminage . .	. . . .	»	41,00	Navier.
Id. Tirée dans le sens perpendiculaire	. . . .	»	36,00	*Id.*
Cuivre rouge laminé, tiré dans le sens du laminage.	. . . .	»	21,00	*Id.*
Id. de qualité supérieure. . . .	. . . .	»	26,00	Trémery et Poirier St-Brice.
Id. Battu. . . .	. . . .	»	25,00	Rennie.

Tableaux des résistances à la rupture du fer et de quelques autres métaux tirés à la filière.

Expériences de M. Séguin aîné sur la résistance à la rupture des fils de fer non recuits. Le diamètre n'a point été mesuré, mais conclu de la longueur du fil mis en expérience, en supposant le poids spécifique du fer égal à 7780 kilogr.

NUMEROS du commerce.	DIAMÈTRES en millimètres.	POIDS TOTAL qui a produit la rupture en kilog.	POIDS par millimètre carré.	PROVENANCE.
18	3,366	505,60	56,77	De Bourgogne Fabrique inconnue.
7	1,062	65,50	73,73	*Idem.*
»	0,2294	37,18	89,85	Fil de Laigle employé pour la fabrication des cardes.
»	0,5917	23,60	85,73	Passe-perle.
1	0,6188	25,96	86,11	Tous ces fils proviennent de la manufacture de Ve Fleur de Besançon.
2	0,7078	34,25	86,98	
3	0,7327	34,12	80,84	
4	0,8380	42,30	76,61	
5	0,9115	47,25	72,34	
6	1,022	62,56	76,08	
7	1,080	65,25	71,21	
8	1,123	66,75	67,28	
9	1,293	91,74	69,77	
10	1,435	105,00	64,84	
11	1,476	100,25	58,56	
12	1,691	124,80	55,52	
13	1,800	145,50	57,18	
14	2,072	166,50	49,32	
15	2,226	202,00	51,86	
16	2,489	311,00	63,87	
17	2,695	389,00	68,15	
18	3,087	617,00	84,00	
19	3,492	750,00	78,23	
20	4,140	874,75	65,74	
21	4,812	1138,00	62,52	
22	5,449	1579,00	67,66	
23	5,942	1738,50	62,63	

Il résulte des expériences consignées dans ce tableau, que la résistance à la rupture qui, pour les fils très-fins, s'élève jusqu'à près de 90 kilogrammes par millimètre carré, diminue avec le diamètre des fils jusque vers le nº 14 du commerce auquel correspond un diamètre

de 2 millimètres environ, qu'elle augmente ensuite jusqu'au n° 18, dont le diamètre est à fort peu près de 3 millimètres, et la résistance à la rupture presque égale à celle des fils les plus fins, pour diminuer de nouveau avec l'accroissement du diamètre, sans que pour cela la diminution soit aussi rapide qu'en descendant vers les diamètres inférieurs jusqu'au n° 14.

M. Séguin a aussi fait quelques expériences sur l'influence du recuit. Il en résulte que le recuit diminue à peu près de moitié la résistance à la rupture. Ainsi, un fil de $1^{m},062$ de diamètre, non recuit a supporté, avant de rompre, un poids de $65^{kil},50$, c'est-à-dire $73^{kil.},73$ par millim. carré (résultat moyen de quatre expériences), et le même fil recuit a rompu sous un poids de $31^{kil.},50$ ou $36^{kil.},09$ par millim. carré.

Un autre fil de $1^{milli.},172$ de diamètre recuit inégalement a rompu sous un poids de $41^{kil.},30$, ou $38^{kil.},24$ par millimètre carré.

Nous rapporterons plus bas les résultats relatifs aux lois de l'allongement des fils recuits et non recuits.

On doit à M. Brix, habile ingénieur prussien, et professeur de mathématiques appliquées à l'École royale d'architecture de Berlin, une série nombreuse d'expériences sur les résistances à la rupture et à l'extension des fils de fer de divers diamètres et provenances.

Voici les résultats du tableau contenant le résumé des expériences comparatives de M. Brix sur les fils, recuits et non recuits, dont le diamètre est analogue à celui du n° 18 des fabriques françaises des départements de l'Est (1).

---

(1) *Abdhandlung über die cohäsions und elasticitäts verhältnisse*, etc., von A. F. W. Brix. Berlin, 1837.

DÉSIGNATION des fils essayés, par leurs numéros, les noms du commerce et les provenances.	Diamètre en millimètres.	SECTION en millim. carrés.	POIDS du fil par mètre courant en kilogr.	Poids qui a produit la rupture d'après la moyenne des essais par millim. carré.	OBSERVATIONS.
Feinmemel n° 9 de la fabrique de Schmidt et fils, à Evrlingen, près Iserlohn (Prusse), non recuit, tel qu'il vient de la fabrique. .	3,357	8,8473	0,0702	67,50	
Même fil, recuit. . .	3,357	8,8473	»	13,60	Le rapport de 4,36 à 67,5 est égal à 2,3 en nombres ronds.
Klinkmemel n° 10, de la même fabrique, non recuit, tel qu'il vient de la fabrique.	2,79	6,1123	0,0501	73,60	
Même fil recuit. . .	2,79	6,1123	»	43,30	
Feinmemel n° 7, de la fabrique de J. C. Rumpet et Cie, à Altena, non recuit. .	3,14	7,7358	0,0609	64,30	Le rapport de 43,30 à 73,6 est égal à 0,59.
Klinkmemel n° 8, de la même fabrique, non recuit.	2,834	6,3046	0,0511	69,90	
N° 11 des usines de la Compagnie pour la fabrique des fils de fer, à Eschweiler, non recuit.	2,987	7,002	0,0571	68,0	
N° 11 1/2 de la même fabrique, non recuit. .	2,834	6,3046	0,05185	76,1	
Fil n° 18, de la fabrique de Dubost frères, forges de Châtillon (Doubs), non recuit.	2,965	6,9002	0,0553	73,60	
Fil n° 18, de Vandel frères et fils, forges de la Ferrière près Pontarlier (Doubs), non recuit.	2,987	7,002	0,0560	73,30	
Fil n° 18 de la fabrique de Mouret et Vellorellle, à l'usine de Chenecey (Doubs) non recuit.	2,943	6,7991	0,0557	74,60	
Fil n° 18, de Vantrin et Villiers, forges des Lods, près Ornans (Doubs), non recuit. .	2,987	7,002	0,0587	70,10	
Fil n° 18, de la fabrique de Neuhaus et Panserot à Bienne, canton de Berne en Suisse, non recuit.	3,052	7,3121	0,0626	88,60	
Fil de fer anglais n° 11, tiré de Hambourg par la voie du commerce, non recuit. .	2,987	7,002	0,0553	68,90	

D'après ces expériences, dont les résultats s'accordent assez bien avec ceux obtenus par M. Séguin, si l'on a égard à la difficulté que présente la détermination exacte du diamètre des fils, le recuit diminuerait d'un peu plus d'un tiers la résistance absolue à la rupture des fils de fer.

Tableau des résistances à la rupture des fils minces de fer, de cuivre et de laiton, résultant des expériences de M. Baudrimont (*Ann. de physique et de chimie*, t. LX). Les fils ont été écrouis par le passage à la filière et non recuits.

INDICATION DES SUBSTANCES.	Diamètre en milli-mètres.	POIDS qui a produit la rupture.	POIDS par milli-mètre carré.	OBSERVATIONS.	
		kil.	kil.		
Fil de fer. . .	0,35	11,8383	113,18		
Id. . .	0,50	14,9753	70,14		
Id. . .	0,535	17,6053	78,17		
Fil de laiton.	0,1750	2,03675	77,89	Composition du laiton..	Cuivre. 87,492 Zinc. . 12,509
Id. . .	0,65	25,891	71,76	*Id.*	Cuivre. 66,90 Zinc. . 33,10 Trace d'étain.
Id. . .	0,4718	14,922	78,50	*Id.*	Cuivre. 71,80 Zinc. . 28,20
Id. . .	0,5185	16,177	70,46	*Id.*	Même composition que le précédent.
Fil de cuivre.	0,50	10,3567	48,51		
Id. . .	0,7125	14,2353	32,84		

M. Baudrimont a trouvé que la ténacité de tous les fils diminue à peu près de moitié, et souvent plus, par le recuit.

On remarquera que la résistance absolue des fils de laiton à la rupture, est beaucoup plus forte que celle des fils de cuivre, et à peu près égale à celle des fils de fer; que cette résistance paraît en outre demeurer à peu près la même pour des alliages dont la composition varie entre des limites assez étendues. Les expériences de M. Dufour s'accordent avec celles de M. Baudrimont, pour faire voir que la ténacité du fil de laiton mince est sensiblement égale à celle du fil de

fer. Cette ténacité diminue avec l'augmentation du diamètre, et n'est plus que de 50 kilogrammes par millimètre carré (expériences de MM. Dufour et Ardant), pour les fils moyens de plus d'un millimètre de diamètre, de sorte qu'elle deviendrait alors inférieure à celle du fil de fer de même diamètre. (*Voyez* les tableaux contenant les résultats des expériences de MM. Séguin aîné, et Brix.)

La loi des allongements du fer, sous des tractions croissantes jusqu'à celles qui déterminent la rupture, a été observée directement, avec beaucoup de soin, par M. Brix, pour les fils de fer dont il a déterminé la résistance absolue à la rupture. Ses nombreuses expériences montrent que, sous des tensions faibles, dont la limite supérieure est comprise entre le tiers et le quart de la charge qui déterminerait la rupture, l'allongement des fils demeure proportionnel à la charge, et disparaît complètement après que la tension a été supprimée. Au delà de cette limite, les allongements croissent dans une proportion plus grande que les charges. Lorsque celles-ci sont supprimées, les fils se raccourcissent, sans revenir tout à fait à leur longueur primitive. Si, de l'allongement total pris sous la charge, on retranche l'allongement permanent que conserve le fil déchargé, la différence, égale à l'allongement *non permanent* du fil, demeurera proportionnelle aux charges jusqu'à l'instant de la rupture ; de sorte que, pour toutes les charges qui altèrent l'élasticité du fil et produisent un allongement permanent, l'allongement peut être regardé comme composé de deux parties : l'une exactement proportionnelle à la charge, qui disparaît avec celle-ci par l'effet de l'élasticité de la matière, l'autre permanente, qui mesure la ductilité du métal et qui croît suivant une proportion beaucoup plus rapide que la charge. Les fragments d'un fil, qui a été rompu par un effort de traction suffisant, sont encore élastiques, aussi parfaitement élastiques que le métal primitif ; ils s'allongent sous des charges inférieures à celles qui ont produit la rupture, et reprennent ensuite leur longueur primitive ; mais ils ne sont plus sensiblement ductiles, ou susceptibles de s'allonger d'une manière permanente. Le recuit peut seul leur rendre la ductilité détruite.

La loi que nous venons d'énoncer, a d'abord été reconnue par le chevalier de Gerstner, dans des expériences qu'il fit en l'année 1824, sur la résistance du fer. Elle nous semble bien établie par les expériences nombreuses et très-soignées de M. Brix, dont on peut voir la description dans l'ouvrage cité. Néanmoins nous devons dire, qu'elle ne s'accorderait pas avec les expériences d'autres auteurs, et notamment de M. Ardant, citées dans la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet,

qui n'a pas fait mention des expériences de M. Brix, mais qu'elle s'accorde avec des expériences de Coulomb sur la torsion des fils de fer et de cuivre, et sur la flexion des lames élastiques, ainsi qu'avec les expériences du professeur M. W. Weber de Göttingue, sur l'élasticité des fils de soie (*Ann. de physique* de Poggendorf, p. 1835, p. 147. *Voyez* aussi le *Recueil des Mémoires des savants de Göttingue*).

Nous nous bornerons à rapporter ici le tableau contenu dans l'ouvrage de M. Brix, des allongements d'un fil de fer non recuit, n° 8 de la fabrique de Neuhaus et Panserot, d'un diamètre de 3^{milli},033, et d'une longueur totale de 432^{lignes},09 (mesure de Prusse), 9 mètres 42 millimètres.

CHARGE TOTALE due à l'action constante du levier de l'appareil et de la charge ajoutée en livres de Cologne.	LONGUEUR du fil en lignes du Rhin.	CHARGE due aux poids mis dans le plateau de la balance qui s'ajoute à la charge du levier en livres de Cologne.	ALLONGEMENTS totaux sous la charge.	ALLONGEMENTS persistants après l'enlèvement de la surcharge.	ALLONGEMENTS élastiques ou non persistants.	DURÉE des expériences.
262,60	432,09	»	»	»	»	
363,60	432,25	101,00	0,14	»	0,14	
262,60	432,09	»	»	»	»	
464,60	432,37	202,00	0,28	»	0,28	1/2 heure.
262,60	432,09	»	»	»	»	
565,60	432,52	303,00	0,43	»	0,42	1 heure.
262,60	431,10	»	0,01	0,01	»	
666,60	432,69	404,00	0,60	»	0,56	1 heure.
262,60	432,13	»	0,04	0,04	»	
767,60	432,85	505,00	0,76	»	0,70	1 heure.
262,60	432,15	»	0,06	0,06	»	
868,60	433,03	606,00	0,94	»	0,83	1 h. 1/2.
262,60	332,20	»	0,11	0,11	»	
969,60	433,24	707,00	1,15	»	0,98	1 h. 1/2.
262,60	432,26	»	0,17	0,17	»	
1070,60	433,47	808,00	1,38	»	1,14	1 h. 1/2.
262,60	432,33	»	0,24	0,24	»	
1171,60	433,76	909,00	1,67	»	1,26	2 heures.
262,60	432,50	»	0,41	0,41	»	
1272,60	434,23	1010,00	2,14	»	1,39	2 heures.
262,60	432,84	»	0,75	0,75	»	
1373,60	435,31	1111,00	3,22	»	»	Rupture.

Nous avons conservé les mesures de Prusse, parce que, comme il ne s'agit ici principalement que des rapports de longueur, l'unité de mesure ne change pas les résultats principaux.

Il résulte de ce tableau, que l'allongement non persistant, demeure

jusqu'à la fin sensiblement proportionnel à la surcharge, et égal moyennement à 0lig.,001,386 par livre de surcharge.

L'allongement persistant dû à la ductilité, commence à être sensible sous une charge de 565liv.,60 égale à la fraction $\frac{565,60}{1373,60} = 0,41$ de la charge qui détermine la rupture. Cet allongement croît très-rapidement avec la charge.

Le coefficient d'élasticité du fil de fer soumis aux épreuves précédentes, est, en traduisant les mesures prussiennes en mesures françaises :

$$E = 20.020.000.000.$$

pour le déterminer d'après les expériences qui précèdent, on calculera d'abord la longueur du fil dans l'état naturel, en retranchant de la longueur 432lig.,09 qu'il a sous la charge de 262liv.,60, l'allongement correspondant et proportionnel qu'il est facile d'obtenir, d'après les résultats du tableau, qui montrent que cet allongement est de 0lig.,14 par 101 livres. On trouvera ainsi pour la longueur du fil, sans charge, 431lig.726; le poids nécessaire pour allonger le fil d'une longueur égale à sa longueur primitive, serait ensuite déterminé par la proportion :

$$x : 101 :: 431,726 : 014 \text{ d'où } x = 311,459^{\text{liv.}},4.$$

la livre, poids de Cologne = 0k,47 : ainsi le poids précédent représente 146,386 kilogrammes, qu'il faut multiplier par le rapport du mètre carré à la section transversale du fil de fer considéré, pour avoir le nombre E, rapporté au mètre carré de section transversale :

On a ainsi :

$$E = 146,386 \times \frac{1,000,000}{7,3121} = 20,020,000,000.$$

Les fils recuits, soumis à des expériences semblables par M. Brix, ont subi généralement des allongements moins réguliers que les fils non recuits; toutefois, les irrégularités sont plutôt particulières à quelques expériences, que générales. Elles paraissent surtout tenir à l'inégalité de la ductilité du fil, dans ses diverses parties, inégalité qui fait qu'au moment de la rupture, certaines parties ont conservé un diamètre presque égal au diamètre primitif, tandis que d'autres se sont amincies très-notablement, le diamètre ayant diminué de $\frac{1}{12}$ ou $\frac{1}{15}$.

Voici d'ailleurs les valeurs des coefficients d'élasticité E qui résultent des expériences de M. Brix, pour les fils de fer dont nous avons déjà fait connaître la ténacité absolue.

DÉSIGNATION des FILS.	Diamètre en millimètres.	Coefficients d'élasticité rapportés au millimètre carré superficiel et au kilog. pris pour unité de poids, tels qu'ils sont calculés par M. Brix.	Allongement total dû à la ductilité jusqu'au moment de la rupture pour 1 mètre de longueur primitive du fil.	Charge correspondante à l'allongement ou l'élasticité commence à être altérée par millimètre carré.	Charge qui produit la rupture par millimètre carré.	Rapport de la charge, minimum capable de produire un allongement permanent à la charge qui produit la ruptupe.
Feinmemel nº 9, non recuit	3,257	20,186	0,00374	33,28	67,50	0,493
Le même recuit. . .	3,035	19,679	0,00832	25,42	43,60	0,583
Klinkmemel nº 10, non recuit. . . .	2,079	21,132	0,00032	37,90	73,60	0,515
Le même recuit. . .	2,079	21,034	0,00937	27,93	43,30	0,645
Feinmemel nº 7, non recuit.	3,014	21,026	0,00264	34,08	64,30	0,530
Klinkmemel nº 8, non recuit.	3,834	20,530	0,00263	37,61	69,90	0,538
Nº 11 de la fabrique deD'Eschweiler,non recuit.	2,987	20,944	0,00272	34,41	68,00	0,506
Nº 11 1/2, même fabrique, non recuit.	2,834	21,245	0,00355	38,96	76,01	0,512
Nº 18, de Dubost frères, non recuit. .	2,965	20,174	0,00226	36,28	73,06	0,493
Nº 18, de Vandel frères.	2,987	19,015	0,00337	35,04	73,03	0,478
Nº 18, de Viount et Veloreille	2,943	20,015	0,00401	38,87	74,06	0,521
Nº 18, de Vautrin et Villiers.	2,987	20,560	0,00436	35,12	70,01	0,501
Nº 18, de Neuhaus et Panserot.	3,052	19,936	0,00424	41,64	88,06	0,407
Fil anglais marqué nº 11.	2,987	18,943	0,00390	32,93	68,09	0,478

Le résultat le plus saillant de ce tableau consiste en ce que les modules d'élasticité du même fil de fer non recuit et recuit diffèrent très-peu l'un de l'autre, et peuvent être, dans la pratique, regardés comme tout à fait égaux entre eux.

Les allongements, par mètre correspondant aux charges capables d'altérer l'élasticité, s'obtiendront en divisant les nombres de la cinquième colonne du tableau par les modules d'élasticité correspondants inscrits dans la troisième. On trouve ainsi pour le Feinmemel nº 9 non recuit, que l'allongement correspondant à un commencement d'altéra-

tion de l'élasticité est de $\frac{33,28}{20186} = 0^m,00165$; pour le même fil recuit, cet allongement est de $\frac{25,42}{19679} = 0^m,00129$; pour le Klinkmemel n° 10 non recuit, de $0^m,00179$; pour le même, recuit, $0^m,00133$; pour le fil de Neubaus et Panserot, dont la ténacité absolue est notablement supérieure à celle de tous les autres fils essayés, de $0^m,00208$ (1).

La valeur du coefficient d'élasticité des fils de fer, conclu des expériences de M. Brix, est un peu supérieure aux valeurs que l'on déduit des expériences, faites en France sur des fils recuits et non recuits par MM. Vicat, Ardant et Savart.

M. Vicat, a trouvé que deux fils de fer des nos 17 et 18 (de 2 1/2 à 3 millim. de diamètre), se sont allongés respectivement de $0^{millim.}0,000,536$ et $0^{millim.}0,000,0579$ de la longueur primitive, par kilogr. de charge et par millimètre carré de section. Ces deux expériences conduisent au coefficient moyen :

$$E = 17933.$$

Des expériences de M. Ardant, citées dans la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet, sur des fils de fer de $1^{millim.},20$ de diamètre, on conclut :

Pour le fil non recuit :	$E = 18300.$
Pour le fil recuit :	$E = 17000.$

Le coefficient d'élasticité diminuerait par le recuit, d'après ces expériences. Celles de M. Brix donnent aussi un coefficient plus petit pour les fils recuits; mais la différence est beaucoup moins considérable.

Les expériences de M. Savart donnent pour un fil de fer mince de $1^{millim.},31$:

$$E = 17900.$$

(1) On pourra remarquer une petite différence entre le module d'élasticité du fil n° 18 de la fabrique de Neuhaus et Panserot porté dans le tableau et le module que nous avons calculé précédemment. Cela tient à ce que M. Brix, pour abréger ses calculs, a pris pour la longueur primitive du fil, sans charge, 432 lignes de Prusse, égale à celle qu'il avait sous la charge de $262^{liv.},60$ due au poids du levier de l'appareil sauf la petite fraction de 0,09 de ligne, tandis que la longueur du fil sans charge eût été seulement de $431^{lig.},726$. La différence n'est au surplus que 1/250 du module 20020 que nous avons calculé.

La loi des allongements du fer en barres, sous des charges croissantes, a été déduite par la plupart des auteurs. Duleau, Tredgold, etc., d'expériences sur la flexion de barres prismatiques, fléchies par un effort perpendiculaire à leur axe. M. Lagebrjelm, en Suède, a fait un grand nombre d'expériences sur la loi des allongements du fer en barre, sous des efforts directs de traction.

Les moyennes des nombreuses expériences de M. Lagebrjelm donnent pour les coefficients d'élasticité :

Du fer de Suède non corroyé et laminé. . . .	20630
Id. martelé. . . .	20820
Fer de Suède corroyé et laminé.	21015
Id. martelé.	19860
Fer anglais à câble.	20050
Des expériences de M. Navier conduisent à la valeur du coefficient.	19400

Ces valeurs sont, comme on voit, très-peu différentes de celles qui résultent des expériences de M. Brix sur les fils de fer; elles sont aussi sensiblement égales aux valeurs moyennes du coefficient d'élasticité du fer en barres, qui se déduit des expériences sur la flexion transversale de prismes posés sur des appuis, faites par Duleau, Tredgold, etc. En conséquence, on peut admettre, dans la pratique, que le coefficient d'élasticité est sensiblement constant pour les fers de diverses natures et de divers échantillons, et adopter pour ce coefficient la valeur moyenne de 20,000 kilogrammes par millimètre carré de section transversale.

Quant à la charge minimum capable de produire un allongement permanent du fer en barres, elle a varié, dans les expériences de divers auteurs, entre des limites très-écartées, comprises entre le tiers et les 2/3 de la charge qui détermine la rupture immédiate.

Les expériences de Lagebrjelm déjà citées, donnent pour la valeur la plus petite du rapport de la charge capable d'altérer l'élasticité à celle qui déterminerait la rupture immédiate, 0,36, et pour la plus grande valeur de ce rapport, 0,438, ce qui donne pour valeur moyenne entre les extrêmes, 0,40.

Les expériences des autres auteurs, faites par traction directe, donnent, pour ce rapport, des valeurs beaucoup plus grandes, et qui varient depuis 0,49 jusqu'à 0,896.

La ténacité absolue du fer en barres étant presque toujours supérieure, d'après les expériences, à 36 kilogrammes par millimètre carré

(voyez le tableau, p. 275), l'allongement correspondant au tiers de cette charge, ou 12 kilogrammes, est, en adoptant 20.000 pour coefficient d'élasticité, $\frac{12}{20000}$ = 0.0006 de la longueur primitive. C'est la mesure de l'allongement qu'on peut faire subir au fer en barres, sans craindre d'altérer son élasticité.

Enfin, quant à l'allongement total qui précède immédiatement la rupture du fer en barres, elle serait, d'après les expériences :

De M. Navier, de	$\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{20}$	de la longueur primitive.
Du capitaine Brown, de .	$\frac{6}{100}$	*id.*
De Lagehrjelm, de. . . .	$\frac{11}{100}$	moyennement.

Ce dernier expérimentateur a trouvé que l'allongement final était très-différent dans les diverses parties d'une même barre rompue par un effort de traction, et le rapport précédent est conclu de l'allongement moyen des barres rompues (1).

Influence de la température sur la résistance à la rupture du fer et du cuivre.

C'est une opinion généralement admise, que les fers sont plus cassants par les fortes gelées qu'aux températures ordinaires de l'atmosphère.

Des expériences de M. Dufour paraissent indiquer une diminution de la ténacité du fil de fer de la température de + 4, à celle de — 6 ou — 6 1/2 degrés centigrades, diminution d'ailleurs très-petite.

Tredgold (cité par M. Poncelet, *Mécanique industrielle*) doit avoir constaté une diminution de ténacité du fer de $\frac{1}{20}$ environ à la température de 67° Réaumur. (Ce fait est en contradiction avec les résultats des nombreuses expériences faites en Amérique par les membres d'une commission de l'Institut de Franklin de Philadelphie, instituée pour étudier les causes des explosions des chaudières à vapeur.)

MM. Minard et Désormes ont trouvé que la diminution de ténacité du bronze serait au moins de $\frac{1}{20}$, à 60° Réaumur.

Enfin MM. Trémery et Poirier Saint-Brice ont trouvé que la ténacité du fer chauffé au rouge sombre n'était que $\frac{1}{6}$ environ de sa ténacité à froid.

---

(1) Nous avons emprunté les chiffres du texte à l'ouvrage si souvent cité de M. Brix.

Les volumes XIX et XX du journal américain de l'Institut de Franklin contiennent de fort nombreuses expériences sur la ténacité du cuivre et du fer à diverses températures, faites avec un grand soin par la commission dont nous avons parlé. Nous consignerons ici les principaux résultats de cet important travail.

La ténacité absolue dû cuivre laminé, aux températures ordinaires de 16 à 25 degrés centigrades, a varié, suivant les divers échantillons, depuis 30,406 jusqu'à 33,775 livres avoir-du-pois par pouce carré anglais, c'est-à-dire depuis 21k,37 jusqu'à 23k,74 par millimètre carré, ce qui s'accorde avec le résultat de l'expérience de M. Navier. La ténacité absolue a diminué avec la température au-dessus de 0 degré centigrade, suivant une loi assez régulière, qui sera indiquée plus tard.

La ténacité à 0 degré étant représentée par l'unité, la diminution de ténacité et la ténacité conservée sont comme suit :

TEMPÉRATURES en degrés centigrades au-dessus de 0.	DIMINUTIONS de la ténacité.	TÉNACITÉS restantes.
16 $\frac{5}{9}$	0,0073	0,9927
50	0,0175	0,9825
100	0,0540	0,9460
150	0,0945	0,9055
200	0,1513	0,8487
250	0,2046	0,7954
255 $\frac{5}{9}$	0,2133	0,7867
280 $\frac{1}{9}$	0,2446	0,7554
294	0,2558	0,7442
316 $\frac{2}{3}$?	0,3307?	0,6693
366 $\frac{2}{3}$	0,3425	0,6575
427	0,4398	0,5602
436 ?	0,5003 ?	0,4997
451	0,4944	0,5056
489	0,5581	0,4419
533 $\frac{1}{3}$?	0,6686	0,3314
546 $\frac{2}{3}$	0,6991	0,3309
555 $\frac{1}{9}$	0,6741	0,3259

Ainsi, la ténacité du cuivre est réduite d'un quart, à la température de 280 degrés centigrades environ, de moitié, vers 430 degrés, et enfin des $\frac{2}{3}$, à 555 degrés.

La loi du décroissement de ténacité est représentée avec une assez grande exactitude par la formule suivante :

$$d^2 = At^3,$$

dans laquelle d est la diminution de ténacité, en parties de la ténacité absolue à 0°, t, la température au-dessus de 0, et A un coefficient numérique qui dépend de l'échelle thermométrique, au moyen de laquelle on évalue les températures t au-dessus de 0. Ces températures étant exprimées en degrés centigrades, le coefficient A est égal à 0,000000002916, de sorte que l'équation devient :

$$d^2 = 0{,}000000002916\, t^3.$$

Il est facile e vérifier que la valeur de d, calculée par cette formule est toujours rapprocbée de la diminution observée et inscrite au tableau, dont elle ne diffère pas de plus des 0,05; on peut donc s'en servir dans la pratique, sans erreur préjudiciable. Toutefois, on ne saurait admettre, ainsi que l'ont remarqué eux-mêmes les auteurs des expériences que nous citons, qu'elle s'étende à toutes les températures; car cette formule donnerait $d = 1$, et assignerait au cuivre une ténacité nulle pour une température égale à $\sqrt[3]{\dfrac{1}{0{,}000000002916}}$ ou 700 degrés centigrades, inférieure certainement à celle de la liquéfaction du cuivre. Déjà, pour la température de 555 centigrades, la formule donne une diminution des 0,7061 de la ténacité à 0, tandis que la diminution observée n'est que les 0,6741. Il semblerait donc, que la courbe qui aurait pour abscisses les températures au-dessus de 0, et pour ordonnées les diminutions de ténacité, se rapprocherait d'abord beaucoup de la parabole cubique, représentée par l'équation $d^2 = 0{,}000000002916\, t^3$, et s'en écarterait ensuite pour des abscisses plus grandes, de manière à demeurer en-dessous de cette courbe. La figure 1, *Pl. XIV*, représente la courbe ayant pour ordonnées les diminutions de ténacité du cuivre, et pour abscisses les excès des températures correspondantes au-dessus de la glace fondante, en degrés du thermomètre de Fahrenheit, avec les points de cette courbe fournis par l'expérience, et son prolongement hypothétique au delà de la température de 1032° F., à laquelle se sont arrêtées les expériences directes.

Dans les nombreuses expériences exécutées sur le fer en barres et

la tôle de fer, à des températures qui ont varié depuis 32° jusqu'à 1317° Fahr. (0 à 714 degrés centigrades), les expérimentateurs de l'Institut de Franklin ont trouvé qu'à partir des températures ordinaires comprises entre 16 et 26° centigrades, la ténacité obsolue du fer augmentait d'abord avec l'accroissement de température. Cet accroissement de ténacité se manifesta nettement par le fait que les échantillons prismatiqnes d'une section uniforme, soumis à l'expérience et plongés sur une partie de leur longueur dans un bain d'huile chaude ou de métal fondu (on employa l'étain et le plomb pour les températures élevées), rompaient en des points situés en dehors du bain chaud, et qu'il était nécessaire de diminuer considérablement à la lime la section du métal, dans la partie échauffée, pour que la rupture se fît dans cette partie et non au dehors. Ce fait a été constaté pour des températures de 100, 200 et 300 degrés centigrades. A cette dernière température seulement, quelques échantillons ne conservaient qu'un degré faible, ou même nul de ténacité, en sus de celle dont ils étaient doués à la température ordinaire; tandis que d'autres échantillons pouvaient être chauffés presque jusqu'à la température de l'ébullition du mercure, 360 degrés centigrades environ, avant que la moindre diminution de ténacité se manifestât. Je cite quelques exemples :

Un barreau de fer de 1pouce,040 de largeur sur 0pouce,271 d'épaisseur (mesures anglaises) fut rompu à la température de 79°,5 Fahr. par une traction de 14,193 livres avoir-du-pois, ou 50,358 livres par pouce carré anglais.

Le même morceau, réduit à l'aide de la lime, sur une partie de son étendue, à 0pouce,950 de largeur sur 0pouce,248 d'épaisseur, rompit, dans la partie amincie, sous une charge de 13,367 livres, à la température de 80 Fahr. (26° $\frac{2}{3}$ centigrades), ce qui donne pour la résistance, par pouce carré de section, 56,736 livres.

Le même morceau, réduit par la lime, sur une portion de sa longueur, à une section de 0pouce,972 de large sur 0pouce,262 d'épaisseur, et dont la partie amincie était placée dans un bain d'huile, chauffé à 212 degrés Fahr. (100 degrés centigrades), rompit sous un effort de traction de 15,077 livres, et la rupture eut lieu, en dehors du bain d'huile, dans la partie où le barreau de fer avait ses dimensions primitives, 1pouce,040 sur 0pouce271. La ténacité du fer, dans cette expérience, serait de 59,203 livres par pouce carré anglais.

Enfin, la partie du barreau baignée dans l'huile entretenue à 100 degrés, ayant été réduite à la lime à 0pouce,850 sur 0pouce,254, la rupture eut lieu dans la partie chauffée sous une traction de 14,678 livres, ce qui fait 67,939 livres par pouce carré.

D'après cela, les ténacités à 26 2/3 degrés centigrades, et à 100 degrés centigrades, paraîtraient proportionnelles aux nombres respectifs 56736 et 67939, en excluant la première expérience qui paraît anomale, et l'accroissement de ténacité de 26° $\frac{2}{3}$ à 100° serait la fraction $\frac{67939 - 56736}{56736} = 0,197$ de la ténacité à 26 degrés.

Dans une expérience analogue, sur un autre échantillon, l'accroissement de ténacité depuis la température ordinaire jusqu'à celle de 214° Fahr. (101°,10 centigr.) a été trouvé les 0,15 de la ténacité primitive. Il y a eu invariablement augmentation de ténacité dans tous les échantillons essayés, depuis la température ordinaire jusqu'à celle de 550° Fahr. (288 centig.), sauf une seule exception où la ténacité, à cette dernière limite, a paru diminuée de 0,004 de sa valeur primitive.

De la température ordinaire à celle de 730° Fahr. (389 degrés centig.), il y a eu tantôt accroissement, tantôt diminution de ténacité.

Au-dessus de 389 degrés centigrades, la ténacité diminue considérablement.

En ayant égard aux expériences faites sur cinq variétés de fer, fabriquées par la compagnie des forges de Salisbury, dans le Connecticut, qui, par leur texture passablement uniforme, paraissent plus propres que les autres échantillons mis en expérience, à donner une base de la loi des ténacités à diverses températures, les auteurs du rapport ont été conduits à admettre que la ténacité maximum du fer excédait de 15,17 pour 0/0 la ténacité observée aux températures ordinaires de 15 à 20, et même 27 degrés centigrades. Ce maximum de ténacité aurait lieu par une température dont le chiffre n'a pu être déterminé exactement, et qui serait comprise entre les précédentes et 288 degrés. Ce principe admis, ils ont obtenu la ténacité maximum en fraction de laquelle ils ont exprimé les diminutions de ténacité correspondantes des températures croissantes.

Nous plaçons ici quelques-uns des résultats consignés dans le tableau imprimé p. 22 du vol. XX du journal de l'Institut de Franklin relatifs aux variations de ténacité, correspondant à diverses températures comprises entre 100 et 714 degrés centigrades, exprimées en fractions de la ténacité aux températures ordinaires. Les nombres inscrits dans les colonnes horizontales successives se rapportent à des fers de diverses qualités et de divers échantillons.

TEMPÉRATURES au moment et dans le lieu de la rupture.	TÉNACITÉ absolue à la température ordinaire en livres avoir-du-poids par pouce carré anglais	TÉNACITÉ absolue aux températures indiquées.	VARIATIONS positives ou négatives en fractions de la ténacité à la température ordinaire.
degrés.			
100	56736	67939	+ 0,197
101	53175	61161	+ 0,150
201	62646	67765	+ 0,081
202	60433	62415	+ 0,03
300	66724	66620	+ 0,002
300	59607	62278	+ 0,045
300	56165	60117	+ 0,07
300 1/9	64511	67503	+ 0,046
301 2/9	51924	63825	+ 0,229
304 1/2	62156	77163	+ 0,052
314 1/2	50316	57310	+ 0,038
332 2/9	59530	60010	+ 0,008
335 1/9	53543	50059	— 0,067
350	59307	58181	— 0,019
390	59397	57903	— 0,026
455	59219	55892	— 0,073
500	59219	45531	— 0,240
508 1/9	58341	42401	— 0,273
550	59219	37410	— 0,369
591 2/9	53426	27604	— 0,483
599 4/9	53426	27602	— 0,483
624	53426	21967	— 0,589
641 2/9	53426	21910	— 0,589
668 1/2	54758	21298	— 0,611
673 7/9	54758	20703	— 0,622
713 7/9	54758	18913	— 0,654

A la température de 713° 7/9 ou 1317° Fahrenheit, le fer est au rouge assez vif pour être aperçu à la lumière du jour. A cette température, la ténacité du fer serait réduite au tiers de ce qu'elle est à la température ordinaire.

Elle serait déjà réduite aux deux tiers à une température intermédiaire entre 500 et 550 degrés.

Enfin elle ne serait nullement affaiblie pour des températures de 300 à 350 degrés, et croîtrait, à partir de ce terme, à mesure que la température diminuerait jusqu'à une certaine limite, au-dessous de

laquelle la ténacité décroîtrait de nouveau, en même temps que la température. A 100 degrés, cette ténacité dépasserait encore d'une manière très-notable la ténacité du métal à froid.

Admettant que la ténacité maximum dépasse, ainsi que nous l'avons dit, de 15,17 pour 0/0 la ténacité observée aux températures ordinaires, les auteurs du rapport ont dressé le tableau suivant, dans lequel se trouvent en regard les excès de la température observée au-dessus de 80° Fahr., ou 27°7/9 centig., et les diminutions correspondantes de ténacité en fonction de la ténacité maximum.

Excès des températures au-dessus de 80° F. ou 27 7/9 degrés cent. Degrés.	Diminutions de la ténacité en fraction de la ténacité maximum.
226 2/3	0,0738
298 8/9	0,0869
313 1/3	0,0899
350	0,1155
410	0,1627
440	0,2010
500	0,3324
554 4/9	0,4478
599 4/9	0,5514
623 7/9	0,6000
669 4/9	0,6622
713 7/9	0,7001

Les premières diminutions de ténacité, jusqu'à 500 degrés centigrades, peuvent être représentées avec beaucoup d'approximation par les ordonnées d'une courbe qui aurait pour abscisses les excès correspondants de température au-dessus de 27 7/9, et dont l'équation serait :

$$d = At^{\frac{11}{5}}$$

d étant la diminution de ténacité correspondant à l'excès t de la température au-dessous de 27 D 7|9, et A un coefficient numérique. Au delà de $t = 500°$ et $d = 0,3324$, la courbe des diminutions de ténacité s'écarterait de la courbe représentée par l'équation précédente, et passerait au-dessous de celle-ci en tournant sa concavité vers l'axe des abscisses, de sorte que la courbe réelle ayant pour ordonnées les diminutions de ténacités, aurait un point d'inflexion dans le voisinage de 500°. On peut prendre pour le coefficient numérique A la valeur moyenne résultant des valeurs correspondantes de d et de t, portées dans le tableau précédent. D'ailleurs, si l'on veut faire usage de cette formule, il faudra se souvenir que la diminution d se rapporte à une ténacité maximum qui dépasse

Digitized by Google

de 15.17 pour 100 la ténacité à froid, et qu'en conséquence, si l'on désigne par T cette dernière ténacité, et par T′ la ténacité à la température de t degrés centigrades, au-dessus de 27 7/9, à laquelle correspond la diminution d conclue de la formule ci-dessus, on aura :

$$T' = T(1 - d) \times 1,1517 = T\left(1 - At^{\frac{35}{5}}\right) \times 1,1517.$$

La figure 2, *Pl. XIV*, représente la courbe ayant pour ordonnées les diminutions de ténacités, et pour abscisses les températures en degrés du thermomètre de Fahrenheit, telle qu'elle est donnée par l'expérience, et jointe au rapport des commissaires de l'Institut de Franklin (*Journal de l'Institut de Franklin*, vol. XIX, juin 1837, à la page 420).

Il est à désirer que les expériences faites par les membres de l'Institut de Franklin soient répétées. Malgré le soin qu'ils ont apporté dans les observations, les difficultés du sujet sont telles, que leurs résultats qui présentent beaucoup d'anomalies, ne peuvent pas encore être adoptés comme définitivement acquis à la science et à l'art des constructions. Cependant, il paraît bien établi que la ténacité du fer augmente plutôt qu'elle ne diminue, depuis les températures ordinaires de 15 à 27 degrés centigrades, jusqu'à celle de 350 degrés environ, point de l'ébullition du mercure ; qu'au-dessus de cette température, elle diminue rapidement, de façon qu'elle est réduite aux 2/3 de sa valeur primitive vers 525 degrés centigrades, et à 1/3 vers 700 degrés.

D'après les mêmes observateurs, la température du rouge sombre, à peine visible dans l'obscurité, serait intermédiaire entre 617 et 644 degrés centigrades, et la température du rouge *visible à la lumière du jour* serait d'environ 674 degrés.

Voici quelques autres résultats obtenus par les expérimentateurs de Philadelphie :

Sur les ténacités comparatives de la tôle tirée dans le sens du laminage, dans la direction perpendiculaire et diagonalement. — La ténacité, dans le sens du laminage, excède en moyenne de 7,1 pour 100 la ténacité dans la direction perpendiculaire, et celle-ci dépasse encore un peu la ténacité dans la direction diagonale.

Sur l'effet de l'écrouissage du fer sous le marteau. — Trois échantillons de fer anglais à câbles, étirés sous le marteau et réduits ensuite à la lime à une section uniforme de 20 millimètres sur 6 environs ont été trouvés posséder, à la température ordinaire, d'après plusieurs expériences, une ténacité moyenne de 42k,50 par millimètre carré. Deux morceaux du même fer ayant été étirés sous le marteau jusqu'aux

dimensions précédentes, et le martelage ayant été continué jusqu'à ce qu'ils fussent presque entièrement refroidis, la ténacité moyenne à la température ordinaire fut trouvée de 49k,90 par millimètre carré.

Augmentation de ténacité avec la densité. — Le fer en barres qu'on a trouvé le plus résistant de tous a été du fer de Russie, qui, d'après la moyenne des essais, avait une ténacité de 53k.47 par millimètre carré. Sa densité était de 7,8014, notablement supérieure à celle de presque tous les autres échantillons essayés.

Sur la ténacité de l'acier fondu. — D'après une expérience à la température ordinaire, la ténacité d'un barreau d'acier fondu a été trouvée de 92 kilogrammes par millimètre carré.

Des charges que l'on doit faire porter aux matériaux dans les constructions.

On doit avoir égard, pour déterminer les dimensions des tiges ou prismes élastiques employés dans les constructions, non pas seulement aux charges permanentes, mais évidemment aussi aux augmentations de charges accidentelles et temporaires, et encore aux allongements ou raccourcissements des fibres qui ont lieu, soit par suite de chocs auxquels les matériaux sont exposés, soit même par la simple *mise en charge* de ces matériaux; cela est surtout indispensable pour la détermination des dimensions de la plupart des pièces qui entrent dans la composition des machines. Elles sont en effet soumises à des efforts alternatifs de tension ou de compression, de sorte que la *mise en charge* se répète périodiquement à des intervalles très-rapprochés.

M. Navier, dans son savant ouvrage sur les ponts suspendus, a donné de beaux exemples de l'application de l'analyse à la recherche des mouvements vibratoires et de l'allongement des fibres des prismes dans le cas de chocs, ou au moment de la mise en charge. M. Poncelet, dans la dernière édition de la *Mécanique industrielle*, a présenté, sur le même sujet, des considérations qu'il a rendues simples et élémentaires, tout en conservant le degré de précision, qui suffit pour les applications pratiques.

Nous présenterons ici, aussi succintement que possible, en suivant la marche adoptée par ce savant, des notions générales, dont nous tâcherons de faire ressortir l'utilité par quelques exemples.

Mouvements vibratoires des prismes élastiques, lors de la mise en charge. Maximum de l'allongement. — Soit un prisme de longueur L, soit a sa section transversale, E le coefficient d'élasticité.

Concevons que ce prisme, suspendu verticalement et fixé par son extrémité supérieure, soit chargé au bas d'un poids Q, attaché très-doucement et sans aucune vitesse acquise. Sous l'action de ce poids, les fibres du prisme s'étendent progressivement, le poids Q s'abaisse et donne lieu à un travail moteur, tandis que la résistance élastique du prisme, qui était nulle à l'origine du temps, et croît avec l'allongement, donne lieu à un travail résistant. Si l'on néglige la vitesse acquise et la masse de la matière du prisme, par rapport à la vitesse acquise et à la masse du poids Q, le principe des forces vives fournit immédiatement l'équation du mouvement. Soit, en effet, à un instant quelconque compté à partir du moment où le poids Q a été attaché au bas du prisme, λ l'abaissement du poids Q; le travail moteur dû à la descente de ce poids sera $Q\lambda$; λ sera aussi l'allongement total du prisme; la résistance élastique sera dans cet instant égale à $\frac{a E\lambda}{L}$, et pour un allongement infiniment petit $d\lambda$, le travail résistant élémentaire développé par cette force sera $\frac{aE}{L}\lambda d\lambda$. L'intégrale $\int_0^\lambda \frac{aE}{L}\lambda d\lambda = \frac{aE\lambda^2}{2L}$ sera donc le travail résistant développé depuis l'origine du mouvement où l'on avait $\lambda = 0$.

La différence $Q\lambda - \frac{aE\lambda^2}{2L}$ doit être égale à la demi-force vive acquise par le poids Q, puisque nous négligeons l'influence de la masse et de la vitesse des particules du prisme. On a donc, en désignant par V, la vitesse du poids Q à un instant quelconque:

$$Q\lambda - \frac{aE\lambda^2}{2L} = \frac{Q}{2g} V^2. \qquad \text{(A)}$$

D'ailleurs $V = \frac{d\lambda}{dt}$, et l'on a la seconde équation:

$$\sqrt{\frac{Q}{2g}}\frac{d\lambda}{dt} = \sqrt{Q\lambda - \frac{aE\lambda^2}{2L}}.$$

Ces deux équations suffisent pour déterminer à un instant quelconque la vitesse V du poids Q et l'allongement λ du prisme.

La première montre d'abord que la vitesse V ne devient nulle, et que l'allongement du prisme ne cesse que lorsque l'on a:

$$Q\lambda = \frac{E\lambda^2}{2L}.$$

d'où on tire :

$$\lambda = \frac{2LQ}{aE}$$

pour la valeur de l'allongement maximum auquel le prisme est arrivé, lorsqu'il cesse de s'allonger. Or, sous une charge Q, l'allongement du prisme en équilibre serait égal à :

$$\frac{LQ}{aE}.$$

Donc, l'allongement maximum du prisme, lors de la mise en charge, est double de l'allongement qui correspond à l'état d'équilibre et à la même charge.

De la seconde équation on tire :

$$dt = \frac{\sqrt{Q}\;d\lambda}{\sqrt{2g}\sqrt{Q\lambda - \frac{aE\lambda^2}{2L}}}.$$

Et en intégrant depuis $t = 0$ et $\lambda = 0$, on a :

$$t = 2\sqrt{\frac{LQ}{gaE}}\ \text{arc sin}\sqrt{\frac{aE\lambda}{2LQ}},$$

de laquelle il résulte :

$$\lambda = \frac{2LQ}{aE}\ \sin^2.\sqrt{\frac{gaE}{LQ}}\,\frac{t}{2}, \qquad (1)$$

et pour la vitesse V, à la fin d'un temps quelconque t :

$$V = \frac{d\lambda}{dt} = \sqrt{\frac{gLQ}{aE}}\ \sin\sqrt{\frac{gaE}{LQ}}\,t. \qquad (2)$$

Digitized by Google

Les équations (1) et (2) font connaître toutes les circonstances du mouvement en fonction du temps t.

On voit d'abord par l'équation (2) que la vitesse V, qui est nulle à l'origine, pour $t = 0$, redevient périodiquement nulle au bout d'un temps quelconque t, tel que l'on ait :

$$\sin \sqrt{\frac{gaE}{LQ}}\, t = o,$$

d'où l'on conclut :

$$\sqrt{\frac{gaE}{LQ}}\, t = n\pi \text{ et } t = \pi \times n \sqrt{\frac{LQ}{gaE}}. \qquad (a)$$

où π est le rapport de la circonférence au diamètre égal à 3,1416, et n un nombre entier quelconque.

La plus petite durée, au bout de laquelle la vitesse devient nulle, et où le prisme a atteint son plus grand allongement, s'obtient en faisant dans la formule (a) $n = 1$, et on a par conséquent pour la durée de cet allongement, désigné par T :

$$T = \pi \sqrt{\frac{LQ}{gaE}}.$$

L'allongement du prisme, à cet instant, s'obtient en portant cette valeur de T dans l'équation (1), qui donnne pour l'allongement maximum que j'appellerai l :

$$l = \frac{2LQ}{aE} \sin^2 \frac{\pi}{2} = \frac{2LQ}{aE},$$

ainsi que nous l'avions déjà conclu de l'équation (A). La résistance élastique l'emporte alors sur le poids Q, qui se relève, par le raccourcissement du prisme, jusqu'à ce que le travail moteur dû à la résistance élastique soit égal au travail résistant développé par l'élévation du poids Q. Or, cela arrivera, si l'élasticité n'est point altérée, lorsque le prisme sera revenu précisément à sa longueur primitive. Effectivement, l'équation (3) donne pour la vitesse $V = \frac{d\lambda}{dt}$ une valeur négative, dès que la valeur de t devient supérieure à $\pi \sqrt{\frac{LQ}{gaE}}$, va-

leur négative qui croît d'abord et décroît ensuite jusqu'à devenir nulle de nouveau, lorsque le temps écoulé à partir de l'origine du mouvement est devenu égal à $2\pi\sqrt{\frac{LQ}{gaE}}$, et pour cette valeur de t, l'équation (1) donne pour l'allongement $\lambda = 0$. Le prisme revenu à sa longueur primitive, le mouvement d'allongement recommencerait de la même manière, et l'on aurait ainsi une série d'oscillations du poids Q dans le sens vertical, qui se renouvelleraient indéfiniment, si le mouvement vibratoire ne s'éteignait par les résistances extérieures, la propagation du mouvement dans le milieu ambiant, et dans la masse des points d'attache du prisme.

En résumé, on voit 1° que, lors de la mise en charge du prisme, la charge étant posée sans aucune vitesse acquise, le plus doucement possible, l'allongement des fibres est précisément double de celui qui correspond à l'état d'équilibre du prisme sous cette charge; 2° que la durée de cet allongement est égale à $\pi\sqrt{\frac{LQ}{gaE}}$; 3° enfin, que la vitesse de descente du poids atteint son maximum pour un allongement, que l'on déterminera en égalant à 0 la dérivée du premier membre de l'équation (A), ce qui donne :

$$\frac{aE\lambda}{L} = Q, \qquad \text{d'où} \quad \lambda = \frac{QL}{aE},$$

ce qui est précisément l'allongement correspondant à l'état d'équilibre du prisme sous la charge Q. Cette vitesse maximum est donnée par l'équation :

$$\frac{Q^2L}{2aE} = \frac{Q}{2g}V^2, \qquad \text{d'où} \qquad V = \sqrt{\frac{gQL}{aE}}.$$

Nous n'avons point tenu compte, dans ce qui précède, de la masse du prisme ni de la vitesse acquise par ses différentes parties. La solution complète de la question est donnée par une équation aux différences partielles. Nous renvoyons le lecteur, pour cette solution, à la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet.

Il résulte de ce qui précède, que, si un prisme fixé par son extrémité supérieure est successivement chargé d'un poids Q à son extrémité inférieure, puis déchargé de ce même poids, lorsque les vibra-

Digitized by Google

tions résultant de la mise en charge ont pris fin, ensuite chargé de nouveau, et ainsi indéfiniment, ce prisme subira, chaque fois qu'il sera chargé, un allongement aussi fort que s'il supportait une charge constante précisément double du poids Q, bien que la charge soit toujours mise avec beaucoup de douceur; les dimensions devront donc être fixées en conséquence.

Tiges prismatiques qui agissent alternativement en tirant et en poussant. — Si nous considérons une tige prismatique, qui agisse alternativement en tirant et en poussant, comme le font beaucoup de pièces de machines, ses fibres seront allongées, au moment où elles auront à supporter des forces qui tendront à les raccourcir, et inversement; de sorte que dans les instants qui suivront le changement de direction des forces par rapport à l'axe de la tige, la résistance élastique des fibres et les forces extérieures agiront dans le même sens, et par suite leurs quantités de travail s'ajouteront. Si, par exemple, une tige, qui agit en poussant, supporte des efforts égaux à ses deux extrémités : F désignant l'intensité de ces forces, le raccourcissement des fibres sera, en conservant les notations précédentes, $\frac{FL}{aE}$. Si on conçoit que les forces comprimantes se changent tout-à-coup en forces tirantes, les fibres s'allongeront et l'allongement ne cessera que lorsque le travail résistant développé par l'extension des fibres, aura détruit le travail moteur dû aux forces tirantes et à l'allongement des fibres comprimées, depuis le changement de direction des forces, jusqu'à ce que le prisme soit revenu à ses dimensions primitives. Or, si on désigne par λ' l'allongement total maximum du prisme, le travail résistant dû à l'allongement sera $\frac{aE\lambda'^2}{2L}$.

Le travail moteur dû au retour des fibres à leur longueur primitive, sera $\frac{aE\lambda^2}{2L}$, λ désignant le raccourcissement initial des fibres, sous la pression F, le travail moteur dû à l'action des forces tirantes F, sera :

$$F(\lambda+\lambda'),$$

on aura donc l'équation :

$$F(\lambda+\lambda')+\frac{aE\lambda^2}{2L}=\frac{aE\lambda'^2}{2L},$$

pour déterminer λ'.

Remplaçant F par sa valeur $\frac{aE\lambda}{L}$, il vient :

$$\frac{3aE\lambda^2}{2L}+\frac{aE}{L}\lambda\lambda'=\frac{aE}{2L}\lambda'^2,$$

ou en divisant par $\frac{aE}{2L}$,

$$3\lambda^2=\lambda'^2-2\lambda\lambda' \text{ et } \lambda'=\lambda+\sqrt{4\lambda^2}=3\lambda.$$

Le plus grand allongement des fibres serait donc triple de l'allongement dû à la charge F, dans l'état de stabilité.

Sans doute, dans les machines bien construites, les forces appliquées à l'extrémité d'une tige, ne changent pas brusquement de direction en conservant leur intensité, ainsi que nous l'avons supposé. Mais, malgré que les changements de direction des forces soient graduels, au lieu d'être subits, il n'en résulte pas moins dans l'étendue des tiges, qui sont alternativement étendues et comprimées, des mouvements vibratoires qui les fatiguent beaucoup plus que ne le ferait une charge permanente. L'expérience démontre ce fait, et les constructeurs ne manquent pas d'y avoir égard, pour fixer les dimensions de ces tiges, qui, d'après les aperçus précédents, doivent avoir une section transversale triple de celle qui suffirait, si elles étaient chargées d'une manière permanente, du plus grand effort qu'elles aient à supporter.

Pour offrir un exemple de l'application des principes précédents, nous supposerons qu'on veuille fixer les dimensions d'une tige en bois de sapin, de 60 mètres de longueur, destinée à transmettre le mouvement alternatif d'un balancier au piston d'une pompe élévatoire de mine, dont le corps de pompe a un diamètre de $0^m,30$, et qui élève l'eau à une hauteur verticale de 55 mètres, dans une conduite de tuyaux superposés directement au corps de pompe, et dans lesquels circule la tige en bois.

On calculera d'abord la pression d'eau supportée par la tête du piston, quand il s'élève et qu'il a pris un mouvement uniforme. On trouve que cette pression est égale à $\overline{0^m,30}^2 \times 0,7854 \times 55 \times 1000 = 3887$ kilogrammes. La tige en bois étant supposée prismatique, et plongée dans l'eau qui remplit le tuyau ascensionnel, sur toute sa longueur, il faudra pour avoir la charge supportée par l'extrémité supérieure de cette tige, ajouter à la charge d'eau précédemment calculée, le poids total de la tige et du piston, et en retrancher la poussée de l'eau sur la portion de tige immergée, poussée qui agit verticalement de bas en haut, et diminue d'autant la charge supérieure. Nous admettrons que le piston, avec un bout de tige en fer qui le relie à la

tige en bois, pèse 100 kilogrammes; que le poids spécifique (par mètre cube) du bois de sapin est de 650 kilogrammes; que les armatures en fer de la tige, pèsent 200 kilogrammes. Désignant alors par a^2 la section de la tige en mètres carrés, et supposant la longueur totale de la tige jusqu'au point d'attache supérieur, égale à 60 mètres, le poids à ajouter à la charge d'eau sera :

$$650\, a^2 \times 60 + 300.$$

La poussée du fluide à retrancher sera égale à $Ha^2 \times 1000$, H désignant la portion immergée de la tige, au moment où le piston commence à se soulever. Supposons que H soit égal à 52 mètres, le poids total, dont sera chargée l'extrémité supérieure de la tige sera :

$$3887 + 300 + (650 \times 60 - 1000 \times 52)\, a^2 \text{ kilogrammes.}$$

A cela, il faut encore ajouter l'effort nécessaire pour vaincre les frottements du piston. M. d'Aubuisson évalue d'après ses expériences, aux $\frac{8}{100}$ au plus du poids de la colonne d'eau soulevée, la résistance moyenne des frottements, pendant l'excursion du piston. Comme ici il faut prendre les frottements au départ, qui sont nécessairement plus forts que pendant la durée du mouvement, et que l'inertie des masses a aussi une faible influence, nous augmenterons de près d'un cinquième le poids de l'eau soulevée par le piston, que nous porterons à 4600 kilogrammes en nombres ronds, au lieu de 3887; la charge sur l'extrémité de la tige sera ainsi fixée à

$$4900 - 13000\, a^2 \text{ kilogrammes.}$$

Si on veut faire supporter au bois de sapin 60 kilogrammes par centimètre carré, ou 600000 par mètre carré, on serait conduit, en négligeant l'influence de la surtension et des vibrations dues à la mise en charge, à l'équation suivante, pour déterminer a^2,

$$4900 - 13000\, a^2 = 600000\, a^2 \text{ d'où } a^2 = 0{,}0087,$$

et le côté de la tige, si elle est carrée, serait de $0^m{,}082$.

Il n'est certainement pas de mineur qui ne sache qu'une tige de cette dimension serait bientôt rompue, si elle était placée dans une pompe d'un calibre égal à celui que nous avons supposé, bien que cette tige n'agisse presque qu'en tirant, et ne soit soumise qu'à un très-faible effort de compression, pendant la descente du piston. Si on part au contraire du principe, que l'allongement des fibres peut aller jusqu'au triple de celui qui correspondrait à l'état d'équilibre sous la charge calculée, on devra calculer la section de la tige à raison d'une charge de 20 kilogrammes seulement par centimètre carré, et on aura pour déterminer a^2, l'équation :

$$4900 - 13000\,a^2 = 200000\,a^2;$$

d'où

$$a^2 = \frac{4900}{213000} = 0^{m.\,car.},023 \text{ et } a = 0^m15,$$

dimension qui est en effet à peu près celle que les constructeurs adopteraient pour une semblable tige.

Résistance vive élastique. — L'orsqu'un prisme est soumis à un choc ou à un effort variable et subit, qui tend à le comprimer ou à l'étendre, le prisme se contracte ou s'étend jusqu'à ce que le travail résistant développé par la contraction ou la dilatation des fibres, ait détruit la force vive que possédait la masse choquante ; l'élasticité du prisme sera donc altérée, si la demi-force vive possédée par la masse choquante, dépassait le travail résistant auquel donne lieu la variation de longueur des fibres, depuis l'état naturel jusqu'à la limite d'élasticité, et le prisme sera rompu par le choc, si cette demi-force vive excède le travail résistant dû à la variation de longueur des fibres, jusqu'à l'instant de la rupture du corps. On est donc conduit à considérer dans les prismes exposés à des chocs, ainsi que l'a fait M. Poncelet, dans la deuxième édition de sa *Mécanique industrielle*, ce que ce savant ingénieur appelle la *résistance vive* des prismes, et l'on doit distinguer la résistance vive élastique, et la résistance vive à la rupture.

E étant le coefficient d'élasticité d'un corps, l le plus grand allongement ou raccourcissement qu'il puisse prendre, sans que son élasticité soit altérée, a l'aire de sa section transversale, L sa longueur, la résistance vive élastique du corps sera égale au travail résistant développé par l'extension des fibres depuis o jusqu'à l, travail que nous savons être égal à $\frac{aEl^2}{2L}$. Or, la longueur l est proportionnelle à la longueur totale L du prisme, et si l'on pose $\frac{l}{L} = \alpha$, α désignant l'allongement ou le raccourcissement par unité de longueur, qui correspond à la limite de l'élasticité, on aura pour la résistance vive du prisme :

$$\frac{aE\alpha^2L}{2}$$

Ainsi, la résistance vive élastique, croît proportionnellement à la longueur des prismes. D'une autre part, si l'on désigne par Q la charge capable d'allonger ou de raccourcir le prisme de la longueur l, ou ce

qui est la même chose, de la longueur α par unité de longueur primitive, c'est-à-dire la charge qui mesure la résistance élastique simple du prisme, on a $Q = aE\alpha$, et par conséquent la résistance vive est égale à $\frac{Q\alpha L}{2}$. Elle croît donc comme la résistance élastique simple, comme l'allongement total α sur l'unité de longueur qui correspond à l'altération de l'élasticité, et comme la longueur totale du prisme. Si un corps pesant P, animé d'une vitesse V, vient frapper suivant son axe un prisme, l'élasticité de celui-ci sera altérée toutes les fois que l'on aura

$$\frac{PV^2}{2g} = \text{ou} > \frac{Q\alpha L}{2}, \text{ ou } \frac{PV^2}{g} = \text{ou} > Q\alpha L,$$

On voit comment la longueur des prismes contribue à les protéger contre les effets des chocs et des forces brusques et variables qui peuvent leur être appliquées, et comment les corps d'une grande raideur pour lesquels l'allongement α est très-petit, sont fragiles et incapables de résister à des chocs même très-modérés.

Nous faisons abstraction, dans tout ce qui précède, de la force vive perdue par le choc, au moment où la masse choquante vient rencontrer le prisme choqué. Cette perte de force vive ne peut que diminuer les effets nuisibles du choc sur l'ensemble du prisme, en détériorant les parties très-voisines du point choqué. Il est impossible d'en tenir compte dans les applications, et cette omission ne présente pas d'inconvénients, puisqu'elle contribue à augmenter l'effet nuisible calculé du choc, au lieu de l'atténuer.

M. Poncelet a désigné par le nom de coefficient, ou module de la résistance vive d'élasticité d'un corps, le produit $\frac{E\alpha^2}{2}$, par lequel il faut multiplier le produit de la section transversale et de la longueur d'un prisme, pour avoir la résistance vive élastique de ce prisme.

Résistance vive à la rupture. — Quant à la résistance vive d'un prisme à la rupture, elle est égale à l'intégrale $\int_0^l aRd\lambda = a \int_0^l Rd\lambda$, dans laquelle a est la section transversale du corps que l'on suppose n'être pas altérée pendant que le prisme s'étend ou se raccourcit jusqu'à la rupture ou à l'écrasement, R est la résistance du corps correspondante à l'unité superficielle de section transversale et à un allongement quelconque λ, compris entre o et l, et l la quantité totale dont le prisme s'allonge ou se raccourcit au moment de la rupture. R est une fonction de λ, qui pour les valeurs de λ inférieures à l'altération de

l'élasticité est égale à $E\frac{\lambda}{L}$, L étant la longueur totale du corps, E le coefficient constant d'élasticité.

Au delà de ce terme, R ne demeure plus proportionnel à l'allongement proportionnel $\frac{\lambda}{L}$, mais il demeure toujours une fonction de cet allongement proportionnel, et la limite supérieure l de l'intégrale est elle-même proportionnelle à la longueur totale L du prisme. Si donc on pose l'allongement proportionnel $\frac{\lambda}{L} = i$, on pourra écrire

$$a\int_0^l \mathrm{R}d\lambda = a\int_0^{i'} f(i)\,\mathrm{L}di = a\mathrm{L}\int_0^{i'} f(i)\,di\ ,$$

i' désignant l'allongement d'un prisme dont la longueur serait égale à l'unité au moment de la rupture, l'intégrale $\int_0^{i'} f(i)\,di$ est ce que M. Poncelet appelle le coefficient de la résistance vive à la rupture, qu'il faut multiplier par $a\mathrm{L}$ ou par le volume du prisme considéré, pour obtenir la résistance vive du prisme à la rupture.

La résistance vive à la rupture ne peut guère être évaluée exactement, sauf dans un petit nombre de cas, parce que la valeur de la fonction $f(i)$ est généralement inconnue au delà des limites où elle cesse d'être proportionnelle à i. Au reste, les matériaux ne doivent point être exposés à des efforts capables d'altérer leur élasticité, et c'est en conséquence la limite de la résistance vive élastique que l'on doit toujours prendre en considération.

Des charges auxquelles le fer peut être soumis dans les constructions. — Comme on doit, dans les constructions, baser ses calculs sur les hypothèses les moins favorables à la résistance des matériaux qu'on emploie, il est évident d'abord, que l'on ne devra jamais exposer le fer à supporter une charge totale composée d'une charge permanente et d'une partie additive accidentelle, égale à plus d'un tiers de celle qui occasionnerait la rupture immédiate. Il faudra même se tenir en dessous de cette limite, parce que le solide capable de supporter une charge donnée, sans altération de son élasticité, est néanmoins susceptible, ainsi que nous l'avons vu, d'être énervé par le fait seul de la *mise en charge*. Il faudra d'ailleurs, comme nous l'avons dit à l'occasion des bois, en citant comme exemple les tiges des pompes, prendre en considération les alternatives plus ou moins fréquemment répétées

des efforts de traction ou de compression, et cela surtout dans le cas où l'on voudra déterminer les dimensions convenables pour des pièces de machines.

Quant à la charge permanente qu'on peut faire supporter au fer dans les constructions, il semble d'abord que si cette charge n'est point susceptible d'accroissement accidentel, on pourrait la fixer au tiers de celle qui occasionnerait la rupture. Mais il est prudent de se tenir, même dans ce cas, en dessous de cette limite. Il résulte en effet de quelques expériences de M. Vicat, qu'une charge incapable d'altérer immédiatement ou en quelques jours, l'élasticité du fer, peut néanmoins l'altérer par une action longtemps prolongée.

Voici ces expériences :

Quatre brins de fil de fer, dont la résistance totale à la rupture était de 43k,25, non recuits, furent attachés par une de leurs extrémités à un point d'appui inébranlable, et chargés respectivement de poids égaux au quart, au tiers, à la moitié et aux trois quarts de leur résistance absolue. Un appareil très-sensible indiquait les allongements; tous ces brins s'allongèrent immédiatement, après la mise en charge, d'une quantité qui ne fut point mesurée; à la fin de la première année, on trouva que :

Le brin n° 1 s'était allongé de . . . . . . $\frac{3}{10000}$.

Le brin n° 2 de. . . . . $\frac{140}{10000}$

Le brin n° 3 de. . . . . $\frac{195}{10000}$.

Le brin n° 4 de. . . . . $\frac{315}{10000}$.

Pendant une deuxième année

Le brin n° 1 ne subit aucun nouvel allongement.

Le brin n° 2 s'allongea de . . . . $\frac{135}{10000}$.

Le brin n° 3 de. . . . . $\frac{214}{10000}$.

Le brin n° 4 de. . . . . $\frac{198}{10000}$.

Pendant la troisième année, le brin n° 4 rompit au bout des neuf premiers mois, par suite d'un point d'oxidation qui s'était formé près du point d'attache, malgré la précaution qu'on avait eue d'enduire les brins d'huile siccative. Il résulte de ces faits, qu'il serait imprudent

de charger le fer dans les constructions, d'une charge permanente qui dépassât le quart de celle qui déterminerait la rupture, quand même on serait sûr qu'aucune addition de charge accidentelle ne peut avoir lieu.

M. Navier, s'appuyant sur l'expérience des constructions existantes, conseille de ne faire supporter aux barres de fer en général, ni une charge permanente supérieure à 1/6 ou 1/7 au plus de celle qui occasionnerait la rupture, et qu'il fixe moyennement à 40 kilogrammes par millimètre carré, ni une charge accidentelle totale supérieure à 1/5 ou 1/4 de cette dernière. M. Duleau fixe également à 6 kilogrammes par millimètre carré, la charge permanente qu'on peut faire porter avec sécurité aux barres de fer dans les constructions. Nous pensons qu'il serait imprudent de s'écarter de cette règle, dans les constructions dont la destruction pourrait offrir quelque danger pour les personnes.

Circonstances dans lesquelles il faut avoir égard aux résistances vives d'élasticité et de rupture. — Quant aux fers exposés à des chocs, à des alternatives d'efforts d'extension et de compression, il faudra évidemment avoir égard, pour déterminer leurs dimensions, à leur longueur, à leur *résistance vive d'élasticité*, et même aussi, comme l'indique M. Poncelet, à leur *résistance vive à la rupture;* parce qu'en cas de choc, qui dépasserait même les limites de l'élasticité, le corps ne romprait point si sa résistance à la rupture était suffisante, et avertirait par sa déformation de l'imminence du danger.

C'est ainsi que quelques personnes ont cru devoir préférer, pour la construction des câbles tressés en fil de fer, dont l'emploi, comme câbles d'extraction dans les puits de mines, devient tous les jours plus fréquent, les fils de fer recuits aux fils non recuits, malgré la supériorité de ces derniers sous le rapport de la résistance absolue à la rupture. Pour les câbles qui devraient servir à descendre les hommes au fond des puits, le choix ne saurait être douteux, et l'on devrait préférer les fils recuits, malgré l'excédant de dépense qui en résulterait. Mais lorsque la rupture du câble ne met pas en danger la vie des hommes, l'expérience a démontré que les câbles en fil non recuit sont beaucoup plus économiques, et par conséquent préférables, bien que ces câbles soient dans une condition qui exige beaucoup de flexibilité, puisqu'ils sont alternativement déroulés et enroulés sur les tambours cylindriques des machines d'extraction.

De la résistance des solides fléchis transversalement à leur longueur.

Solide prismatique encastré par une extrémité et chargé à l'autre extrémité. — Considérons d'abord un solide prismatique ABCD, *fig* 4,

Pl. XII, placé horizontalement, encastré par un bout d'une manière invariable et chargé d'un poids Q appliqué à l'extrémité libre.

Les expériences directes faites sur des corps dont l'extensibilité est prononcée, tels que les bois, le fer et les autres métaux doux, montrent que le solide ainsi placé s'infléchit de manière à prendre une position telle que ABC'D'; que la face inférieure de ce solide, que nous supposerons pour un moment limité par quatre faces planes, dont deux horizontales et deux verticales, dans l'état naturel du corps, que sa face inférieure, dis-je, s'est raccourcie en devenant concave, et que la face supérieure s'est au contraire allongée en devenant convexe. Si l'on se représente le corps comme composé de fibres, ou séries de molécules infiniment déliées parallèles à son axe, on voit que les fibres voisines de la face concave se sont raccourcies, que celles qui sont voisines de la face convexe se sont allongées, et que par conséquent il y a quelque part dans le solide, une suite de fibres dont la longueur est demeurée invariable, et dont l'ensemble forme la surface de séparation entre les fibres dilatées situées au dessus, et les fibres comprimées ou raccourcies situées au dessous.

On admet que, dans l'inflexion du solide, les fibres longitudinales n'ont point glissé les unes sur les autres, de telle sorte que, si l'on conçoit une section plane *st*, faite dans le solide avant l'inflexion, et passant par le point *o* d'une des fibres dont la longueur ne varie pas par l'inflexion, et une section plane aussi *s't'* faite normalement à l'axe du solide infléchi, et passant par le point *o'* à une distance *io'* de la section encastrée, mesurée suivant la fibre infléchie égale à la distance rectiligne *io*, la section *s't'* contiendra après l'inflexion les mêmes particules qui se trouvaient originairement dans la section *st*. Cela étant admis, il en résulte que la ligne qui, dans la section *s't'*, sépare les fibres étendues des fibres dilatées, est une droite horizontale, normale à l'axe du solide infléchi ou droit, et que la surface formée par l'ensemble des fibres de longueur invariable est une surface cylindrique droite dont les génératrices sont horizontales.

Pour des flexions très-petites, auxquelles correspondent par conséquent des allongements et raccourcissements très-faibles des fibres, la résistance de celles-ci est, ainsi que nous l'avons dit en traitant des prismes étendus ou comprimés dans le sens de leur axe, proportionnelle aux allongements ou raccourcissements divisés par les longueurs primitives, et égale au produit de ces variations de longueur proportionnelles, en plus ou en moins, multipliées par le coefficient d'élasticité. On suppose ordinairement, dans la théorie de la résistance des solides fléchis transversalement, que les résistances de toutes les

fibres étendues et comprimées demeurent ainsi proportionnelles aux variations de longueur. Nous exposerons d'abord les résultats obtenus en partant de ce principe; mais nous devons faire observer dès à présent que, si les résistances à la compression ou à l'extension des fibres sont réellement identiques pour les premières variations de longueur, cette égalité peut cesser, et paraît en effet cesser d'exister dans certains corps, pour des allongements ou des raccourcissements qui ne dépassent point encore les limites de l'élasticité et ne donnent point lieu à une déformation permanente; tandis que pour d'autres corps, l'égalité de résistance correspondante à des allongements ou des raccourcissements des fibres égaux entre eux semble se maintenir au delà de ces limites, et même jusqu'au terme de la rupture.

Soit donc *smnt* la section transversale du solide considéré, *fig. 4*, *Pl. XIII*, et *mn* la ligne qui sépare les fibres comprimées aboutissant à la partie *msn* des fibres dilatées ou allongées qui aboutissent à la partie *mtn* de cette section; soit *uv* un élément longitudinal de la section *mtn*, compris entre deux lignes horizontales, infiniment rapprochées parallèles à *mn*. Toutes les fibres qui aboutissent à cette tranche auront été allongées d'une égale quantité, et si l'on désigne par i le rapport de l'allongement de la fibre étendue à sa longueur primitive, par E le module d'élasticité, par U la longueur *uv*, par v, la distance de la ligne *mn* à la tranche *uv*, et par conséquent par dv la largeur infiniment petite de cette tranche, $Ei \times Udv$ sera la somme des forces attractives développées par l'extension des fibres aboutissant à l'élément longitudinal Udv. Ces forces sont toutes parallèles entre elles, puisqu'elles sont tangentes à la courbure des fibres, et par conséquent normales au plan de la section *smtn*. L'intégrale

$\int_0^{v_1} EiUdv = E\int_0^{v_1} Uidv$, v_1 désignant la plus grande valeur de l'ordonnée v, exprime donc la somme de toutes les forces attractives développées par l'extension des fibres, et aussi leur résultante. U et i sont les fonctions de v.

De même l'intégrale $E\int_0^{v_0} Uidv$ exprimera la somme ou la résultante de toutes les forces de répulsion développées par la contraction des fibres, qui aboutissent à la partie inférieure de la section transversale : v_0 désignant l'ordonnée maximum de cette section.

Cela posé, la partie du solide comprise entre la section quelconque *st* et son extrémité libre, considérée comme un solide de forme inva-

riabe, doit être en équilibre, sous l'action simultanée du poids Q et des forces attractives et répulsives développées par les réactions moléculaires des fibres, dans cette section.

Si nous ajoutons au point o', considéré comme appartenant à la portion $t's'C'D'$ du solide, deux forces $+Q$, $-Q$ égales et directement opposées, les conditions d'équilibre ne seront point troublées. Les forces appliquées à cette portion $t's'C'D'$ sont alors un couple $(Q, -Q)$ dont le bras de levier est égal à la projection horizontale de la courbe $o'k$, et une force Q verticale agissant de haut en bas, appliquée en o'. Si la flexion du solide est petite, la direction de cette dernière force s'écartera fort peu du plan de la section $s't'$, et sera presque normale à l'axe du corps infléchi. Comme d'ailleurs nous considérons ici les deux parties du corps séparées par la section $s't'$ comme des solides de forme invariable, l'action de cette force tend à séparer la partie $s't'C'D'$ de l'autre partie du prisme par un glissement des deux parties l'une sur l'autre, suivant le plan $s't'$. Son action dans le sens perpendiculaire à la section $s't'$ est sensiblement nulle, et partant elle ne peut influer que fort peu sur la flexion du corps, et sur l'extension et la compression des fibres qui traversent la section $s't'$. En se bornant donc à considérer le cas où la flexion est fort petite, il est permis de faire abstraction de la force Q appliquée en o', et d'admettre que les forces attractives et répulsives développées par l'extension et la compression des fibres dans la section $s't'$ font simplement équilibre au couple $(Q, -Q)$.

Il faut pour cela : 1° que ces forces attractives et répulsives se réduisent à un couple, ce qui exige que les sommes des forces attractives et répulsives soient égales entre elles. Cette condition est exprimée par l'équation :

$$\int_0^{v_1} Uidv = \int_0^{v_0} Uidv \qquad (1).$$

2° Il faut que le moment du couple résultant des forces attractives et répulsives soit égal au moment du couple Q,—Q, condition qui est exprimée par l'équation :

$$E\left\{\int_0^{v_0} Uivdv + \int_0^{v} Uivdv\right\} = Q \times S \qquad (2).$$

S étant la projection horizontale de la courbe $o'k$.

La première équation détermine la position de la droite mn dans la

section transversale. Il suffit pour cela de déterminer les valeurs de l'extension ou de la compression variable i, en fonction de l'ordonnée verticale v d'une tranche U. Or si l'on conçoit une section plane transversale, normale à l'axe du solide infléchi, et infiniment voisine de la première, les plans de ces deux sections se couperont suivant une droite horizontale projetée en C; si l'on considère seulement une section verticale du solide, parallèle à l'axe, et dans laquelle $io'k$ sera la fibre de longueur invariable, le point de concours C, des deux droites $t's'$ et $t_1's_1'$, intersections de la section verticale dont il s'agit par les plans normaux à l'axe infiniment rapprochés, sera le centre de courbure de la courbe $io'k$ au point o', et $o'C$ le rayon de courbure de celle-ci. Désignant ce rayon par ρ, on a évidemment les deux équations, ou proportions :

$$\frac{t't_1' - o'o_1'}{o'o_1'} = \frac{o't'}{Co'}\;;\quad \frac{o'o_1' - s's_1'}{o'o_1'} = \frac{o's'}{Co'}.$$

Or, les premiers membres de ces deux équations expriment l'allongement et le raccourcissement par unité de longueur, désigné par i, des fibres situées aux distances $o't$ et $o's'$ de la fibre de longueur invariable ou de la droite mn, qui sépare les fibres dilatées des fibres comprimées dans la section $mnst$. Ces allongements ou raccourcissements des fibres sont en conséquence proportionnels à leurs distances respectives à la fibre invariable, et l'on a généralement la relation $i \frac{v}{\rho}$ pour toutes les fibres étendues ou raccourcies; ρ étant constant pour tous les points d'une même section, $\frac{1}{\rho}$ devient un facteur commun à tous les éléments des intégrales $\int Uvdv$; ce facteur peut être supprimé dans l'équation (1) qui se réduit en conséquence à la suivante :

$$\int_0^{v_1} Uvdv = \int_0^{v_0} Uvdv.$$

Elle exprime que les sommes des moments des tranches infiniment minces Udv, dont l'ensemble compose les parties de la section $mnts$ supérieure et inférieure à la droite mn, par rapport à cette droite mn, sont égales entr'elles, et par conséquent que la ligne mn est la droite horizontale qui passe par le centre de gravité de la section transversale, ce qui détermine tout à fait sa position.

L'équation (2) devient, en y remplaçant i par $\frac{v}{\rho}$:

$$\frac{E}{\rho}\left[\int_0^{v_1} Uv^2dv + \int_0^{v_0} Uv^2dv\right] = Q + S.$$

La droite *mn*, à partir de laquelle se comptent les ordonnées, v étant connue de position, ainsi que la forme du solide, U sera une fonctions de v; les deux intégrales $\int_0^{v_1} Uv^2dv$, $\int_0^{v_0} Uv^2dv$ pourront se calculer exactement ou par approximation; la quantité $E\left[\int_0^{v_1} Uv^2dv + \int_0^{v_0} Uv^2dv\right]$ est donc une quantité que l'on pourra déterminer dans chaque cas, et que nous désignerons par la lettre M. C'est ce que M. Navier et les auteurs qui ont écrit sur la résistance des matériaux ont généralement appelé le moment d'élasticité du solide. L'équation précédente se réduit alors à :

$$\frac{M}{\rho} = Q \times S$$

et permet de déterminer l'équation de la courbe qu'affectent les fibres qui, dans l'inflexion, ont conservé leur longueur; courbe dont ρ désigne le rayon de courbure.

Si x et y désignent les coordonnées courantes de cette courbe, par rapport à deux axes, l'un horizontal, l'autre vertical, qui se coupent au point i de la courbe *io'k*, dans la section encastrée, l'expression analytique du rayon de courbure est, comme on sait, $\dfrac{\left(1+\dfrac{dy^2}{dx^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\dfrac{d^2y}{dx^2}}$,

et l'équation différentielle de la courbe sera :

$$\frac{M\dfrac{d^2y}{dx^2}}{\left(1+\dfrac{dy^2}{dx^2}\right)^{\frac{3}{2}}} = Q \times S.$$

Lorsque la flexion demeure extrêmement petite, la longueur de la fibre courbée ne diffère pas sensiblement de sa projection sur l'axe des x, et les tangentes de cette courbe sont toutes extrêmement peu in-

Digitized by Google

clinées sur l'axe des x. $\frac{dy^2}{dx^2}$ demeure donc toujours très-petit par rapport à l'unité, et la longueur S est sensiblement égale à $l - x$, l désignant la longueur totale du solide.

L'équation précédente, en y remplaçant s par $l-x$, et en négligeant $\frac{dy^2}{dx^2}$ par rapport à l'uuité se réduit à :

$$M \frac{d^2y}{dx^2} = Q\,(l-x)\,,$$

qui, intégrée une première fois, donne :

$$M \frac{dy}{dx} = Q \left(lx - \frac{x^2}{2}\right)\,,$$

et par une seconde intégration :

$$My = Q \left(l\,\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right). \qquad \text{(D)}$$

Les constantes introduites par l'intégration sont nulles toutes deux, parce qu'on a à la fois pour $x = o, y = o$, puisque la courbe passe par l'origine des coordonnées, et $\frac{dy}{dx} = o$, parce que la tangente à la courbe à l'origine est nécessairement horizontale, par suite de l'encastrement invariable de la section extrême du corps.

Nous rappellerons que, des observations faites antérieurement, il résulte que l'équation précédente ne peut représenter la courbure moyenne du solide près de l'extrémité libre chargée du poids Q, mais qu'elle doit représenter avec une exactitude très-suffisante la courbe du solide, surtout près de la section d'encastrement, et jusqu'à une distance assez grande de cette section, si la longueur du prisme est considérable par rapport aux dimensions verticales de la section transversale.

En supposant l'équation D tout à fait exacte, on trouvera l'abaissement de l'extrémité libre, ou la flèche maximum du prisme, en faisant dans cette équation $x = l$. La valeur de y correspondante sera celle de la flèche. Désignant celle-ci par F, on a :

$$F = \frac{Q}{M}\,\frac{l^3}{3}.$$

Les allongements ou raccourcissements proportionnels d'une fibre quelconque dans le solide infléchi, dépendent de la distance de cette fibre à la ligne des fibres demeurées de longueur invariable, et sont exprimés par :

$$\frac{v}{\rho}\ v=\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{v}{M}Q(l-x).$$

pour des distances v égales entre elles, dans les diverses sections transversales. Cette variation de longueur est la plus grande possible pour $x=o$, et par conséquent dans la section même contiguë à la section encastrée. Dans cette section, le maximum de variation de longueur correspond à la plus grande valeur de v, c'est-à-dire à la plus grande des deux valeurs v_0 et v_1, qui sont les limites supérieures des intégrales.

Pour que l'élasticité du corps ne soit pas altérée par la flexion, il est nécessaire que cette variation de longueur maximum ne dépasse pas une limite fixe dépendant de la nature du corps mis en expérience, et qui peut être déterminée par l'observation directe de l'allongement et du raccourcissement des solides prismatiques tirés ou pressés dans le sens de leur longueur.

On a fait, comme nous l'avons vu, de très-nombreuses expériences sur les allongements des fibres du fer et même du bois sous des charges directes, et déterminé la limite des allongements au delà de laquelle l'élasticité est altérée. Cette limite serait moyennement pour le fer égale à 0,0006, pour le bois de sapin blanc, d'après l'expérience de M. Ardant, à 0,00117, tandis que d'après les auteurs anglais, elle irait jusqu'à 0,002. On n'a guère fait d'expériences directes sur le raccourcissement des prismes chargés directement, expériences beaucoup moins faciles que les premières, et l'on suppose en général que la limite passé laquelle l'élasticité est altérée par le raccourcissement est la même que pour l'allongement. Cela paraît être ainsi pour certains corps, mais non pour tous, ainsi que nous l'expliquerons un peu plus loin. Pour les corps où les deux limites sont égales, le poids le plus grand dont on puisse charger un solide encastré par une extrémité, sans altérer son élasticité, se déduira sans difficulté de l'équation ;

$$\frac{V}{M}Q\,l=\alpha,$$

dans laquelle V sera la plus grande distance du contour du corps à la ligne des fibres invariables, soit en dessus soit en dessous de cette fibre,

Digitized by Google

et α le maximum de variation de longueur rapportée à l'unité de longueur primitive, que les fibres puissent supporter, sans que leur élasticité soit altérée.

De là on tire :

$$Q = \frac{M\alpha}{Vl}.$$

La valeur de F, correspondante à cette charge maximum, est :

$$F = \frac{l^2\alpha}{3V}.$$

La plus grande variation proportionnelle de longueur des fibres est exprimée en fonction de la flèche, par la relation :

$$\alpha = \frac{3VF}{l^2}.$$

Dans tout ce qui précède, nous avons négligé l'influence du poids de la matière du prisme. S'il était nécessaire d'en tenir compte, cela ne présenterait aucune difficulté. Le poids de la partie du prisme de longueur $l-x$, située au delà de la section quelconque *mnst*, sera égal à $p(l-x)$, p étant le poids de l'unité de longueur du prisme. Le moment de ce poids, par rapport à la ligne des fibres invariables tracée dans la section *mtns*, sera $p\,\frac{(l-x)^2}{2}$, et l'équation d'équilibre sera, en conséquence :

$$M\frac{d^2y}{dx^2} = Q(l-x) + \frac{p(l-x)^2}{2},$$

d'où, en intégrant :

$$My = Q\left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + \frac{p}{2}\left\{\frac{l^2x^2}{2} - \frac{lx^3}{3} + \frac{x^4}{12}\right\}$$

pour $x = l$ on a :

$$y = F = \frac{1}{M}\left(Q + \frac{3pl}{8}\right)\frac{l^3}{3}.$$

La grandeur de la flèche est augmentée, comme elle le serait si les $\frac{3}{8}$ du poibs du prisme étaient ajoutés à la charge Q.

Quant à la plus grande variation de longueur des fibres qui correspond toujours à $x=o$, elle est :

$$\frac{V}{M}\left(Ql+\frac{pl^2}{2}\right)=\frac{V}{M}\left(Q+\frac{pl}{2}\right)l.$$

Ainsi, l'influence du poids du prisme sur cette variation maxima est la même que si la moitié de son poids total $p\frac{l}{2}$ était ajoutée au poids Q, et agissait à l'extrémité libre.

Calcul du moment d'élasticité. Section rectangulaire. — Nous calculerons les valeurs du moment d'élasticité M pour quelques-unes des formes régulières usitées dans les constructions. Si la section du prisme est un rectangle posé de façon à avoir deux faces horizontales et deux faces verticales, dont la largeur, dans le sens horizontal, soit égale à a, et la hauteur verticale soit égale à b, la ligne des fibres invariables, appelée aussi l'axe neutre, divisera la hauteur b du rectangle en deux parties égales, et l'on aura $U=a$, quelle que soit la hauteur de l'ordonnée verticale. En conséquence :

$$M=E\left[\int^{\frac{b}{2}} av^2dv+\int_0^{\frac{b}{2}} av^2dv\right]=2E\int_0^{\frac{b}{2}} av^2dv=E\times\frac{ab^3}{12}.$$

Le plus grand poids dont on puisse charger le solide, sans altérer son élasticité, sera :

$$Q=\frac{Ea\frac{b^3}{12}\times\alpha}{\frac{b}{2}l}=\frac{Eab^2\alpha}{6l}.$$

Ce poids est donc proportionnel, pour des corps de même nature, à la largeur, au carré de la hauteur, et en raison inverse de la longueur du prisme.

La flèche ou l'abaissement de l'extrémité libre est égale à :

$$\frac{Q}{M}\frac{l^3}{3} = \frac{12Q}{Eab^3} \times \frac{l^3}{3} = 4Q\frac{l^3}{Eab^3}.$$

Elle est donc proportionnelle au poids Q et au cube de la longueur, et en raison inverse de la largeur horizontale et du cube de la hauteur verticale du prisme.

Si l'on remplace Q par la limite de poids au delà de laquelle l'élasticité serait altérée, on trouve pour la valeur de la flèche correspondante à cette limite :

$$f = \frac{4}{6}\frac{Eab^2\alpha}{l} \times \frac{l^3}{Eab^3} = \frac{2}{3}\frac{l^2\alpha}{b}.$$

Cette flèche est donc proportionnelle au nombre α et au carré de la longueur du prisme, et en raison inverse de sa dimension verticale.

Moment d'élasticité pour une section triangulaire. — Pour un prisme à base triangulaire isoscèle *abc*, placé de manière que la face *ab* soit horizontale et en dessous, *fig.* 5, *Pl. XIII*, l'axe *mn* est parallèle à la base *ab* et situé à une distance de *ab* égale au tiers de la hauteur. On a donc, en désignant par *a* la base et par *h* la hauteur du triangle :

$$M = E\left[\int_0^{\frac{2h}{3}} Uv^2dv + \int_0^{\frac{h}{3}} Uv^2dv\right].$$

Dans la première intégrale :

$$U = mn \times \frac{\frac{2}{3}h - v}{\frac{2}{3}h} = \frac{a}{h}\left(\frac{2}{3}h - v\right);$$

dans la seconde intégrale :

$$U = mn \times \frac{\frac{2}{3}h + v}{\frac{2}{3}h} = \frac{a}{h}\left(\frac{2}{3}h + v\right).$$

Ainsi :

$$M = E \times \frac{a}{h}\left[\int_0^{\frac{2}{3}h}\left(\frac{2}{3}h - v\right)v^2\,dv + \int_0^{\frac{1}{3}h}\left(\frac{2}{3}h + v\right)v^2\,dv\right]$$

$$M = \frac{Eah^3}{36}.$$

Le plus grand poids dont on puisse charger le prisme à base triangulaire, sans altérer son élasticité, est :

$$Q = \frac{M\alpha}{Vl} = \frac{Eah^3\alpha}{36 \times \frac{2}{3}h \times l} = \frac{Eah^2\alpha}{24l};$$

la flèche correspondante à ce poids, est :

$$f = \frac{Q}{M}\,\frac{l^3}{3} = \frac{Eah^2\alpha}{24l} \times \frac{36}{Eah^3}\,\frac{l^3}{3} = \frac{1}{2}\,\frac{l^2\alpha}{h}.$$

Les résultats seraient identiquement les mêmes, si le prisme était retourné comme dans la *fig.* 5 *bis*, *Pl. XIII*, de manière que le sommet du triangle fût en bas, puisque les résistances élastiques dues à la compression et à l'extension, sont supposées égales, pour des variations de longueur égale.

Moment d'élasticité pour une section carrée. — Pour le prisme à base carrée, placé de façon que deux faces soient horizontales et les deux autres verticales, les valeurs de M, Q et f, correspondantes à la limite au delà de laquelle l'élasticité serait altérée, sont :

$$M = \frac{Ea^4}{12};\quad Q = \frac{Ea^3\alpha}{6l};\quad f = \frac{2}{3}\,\frac{l^2\alpha}{a},$$

a étant le côté du carré.

Si ce même prisme est placé de façon que les deux diagonales du carré soient, l'une horizontale, l'autre verticale, on trouvera sans difficulté que les valeurs de M, Q et f, sont :

Digitized by Google

$$M = \frac{Ea^4}{12};\ Q = \frac{Ea^3\alpha\sqrt{2}}{12l};\quad f = \frac{\sqrt{2}}{3}\frac{l^2\alpha}{a}.$$

Ainsi, les moments d'élasticité pour le prisme à base carrée fléchi perpendiculairement à deux de ses faces, ou perpendiculairement à une diagonale, sont égaux entre eux; mais les poids dont on peut charger le prisme, dans ces deux positions respectives, et les flèches maxima qu'il peut prendre, sans altération de l'élasticité, sont entre elles respectivement comme $\sqrt{2} : 1$.

Moment d'élasticité pour une section circulaire. — Pour le cylindre à base circulaire de rayon r, on a :

$$M = 2E\int_0^r Uv^2 dv = 4E\int_0^r \sqrt{r^2 - v^2}\, v^2 dv = \frac{E\pi r^4}{4}.$$

Le poids minimum capable d'altérer l'élasticité, est :

$$Q = \frac{\pi E r^3 \alpha}{4l};$$

la flèche correspondante à ce poids :

$$f = \frac{l^2\alpha}{3r}.$$

Pour un tuyau creux, cylindrique, dont les rayons intérieur et extérieur sont respectivement égaux à r' et r'', on a :

$$M = E \times \frac{\pi(r''^4 - r'^4)}{4},$$

$$Q = \frac{\pi E(r''^4 - r'^4)}{4r''l},$$

$$f = \frac{l^2\alpha}{3r''}.$$

Solide prismatique posé sur deux appuis. — Quand un solide prismatique est posé librement, dans une position horizontale, sur

Digitized by Google

deux appuis, et chargé dans son milieu d'un poids Q, la pression sur chacun des points d'appui peut être considérée comme agissant dans le sens vertical, et comme étant égale à $\frac{Q}{2}$, pourvu que la flexion du solide soit fort petite. Si donc on imagine qu'une des moitiés du corps infléchi soit transformée en un solide mathématique de forme rigoureusement invariable, l'autre moitié du prisme sera évidemment dans les mêmes conditions que si elle était encastrée invariablement par son extrémité, qui sera maintenant le milieu de la pièce, et sollicitée à son extrémité libre par une force verticale agissant de bas en haut, et égale à la moitié du poids Q posé au milieu. Par conséquent les équations relatives à un prisme encastré par une extrémité et chargé d'un poids à l'extrémité libre, s'appliquent à chaque moitié d'un solide prismatique posé sur deux appuis, et chargé dans son milieu, en remplaçant dans les premières la longueur l du solide par la moitié de la distance horizontale des appuis, et la charge Q par la moitié de la charge placée sur le milieu du solide.

Il résulte de là que la charge capable d'altérer l'élasticité d'une pièce posée horizontalement sur deux appuis et chargée dans son milieu, est égale au double de celle qu'il faudrait pour altérer l'élasticité d'un solide de longueur égale à la demi-distance des appuis, encastré par une extrémité et chargé à l'autre extrémité, ou bien au quadruple de celle qu'il faudrait pour altérer l'élasticité d'un prisme de longueur égale à la distance des appuis, encastré par un bout et chargé à l'autre; que la flèche de la pièce est égale à la moitié de la flèche que prendrait un solide de longueur égale à la demi-distance des appuis, et chargé du même poids à son extrémité libre, ou au seizième de celle que prendrait le solide de longueur égale à la distance des appuis, s'il était encastré par une extrémité et chargé à l'autre.

Quand on veut avoir égard au poids du prisme, il faut considérer que la pression de chaque point d'appui sur le solide, est augmentée du poids de la moitié du prisme, ce qui fait qu'en désignant par q la demi-charge placée au milieu et par l la demi-longueur de la pièce que nous supposons égale à la distance des appuis, la pression de chacun des appuis est égale à $q+pl$. En même temps, les poids des éléments du prisme sont autant de forces verticales agissant de haut en bas, et dont le moment doit par conséquent se retrancher du moment de la force $q+pl$, laquelle agit de bas en haut. Il résulte de là, que l'équation différentielle de la courbe qu'affecte chaque moitié du prisme, est :

$$M\frac{d^2y}{dx^2}=(q+pl)(l-x)-p\frac{(l-x)^2}{2}.$$

sont les moitiés de deux charges différentes, et f', f'' les flèches correspondantes, on a :

$$f' = \frac{1}{AE}(q' + \tfrac{5}{8}pl)\frac{l^3}{3},$$

$$f'' = \frac{1}{AE}(q'' + \tfrac{5}{8}pl)\frac{l^3}{3},$$

d'où

$$f'' - f' = \frac{1}{AE}\, q'' - q')\frac{l^3}{3} \quad \text{et} \quad E = \frac{q'' - q'}{A\,(f'' - f')}\cdot\frac{l^3}{3}.$$

Les valeurs du coefficient E ont été déterminées par des expériences de ce genre pour le fer forgé et fondu, et diverses essences de bois.

Coefficient d'élasticité du fer forgé. — Pour le fer forgé, les nombreuses expériences de M. Duleau conduisent à une valeur moyenne du coefficient E, égale à 20.000.000.000 kilogrammes, qui ne diffère pas sensiblement de la valeur déduite des nombreuses expériences faites sur l'allongement des prismes, sous un effort direct de traction, et que nous avons rapportées en leur lieu.

Coefficient d'élasticité de la fonte. — Pour le fer fondu, les valeurs du coefficient E seraient, d'après les expériences de Rondelet :

9.020.000.000 pour la fonte grise.
10.653.000.000 pour la fonte douce.

D'après les expériences de Tredgold :

12.144.000.000.

D'après les expériences de M. Eaton Hodgkinson sur un barreau de fonte dont la section transversale avait la forme représentée *fig.* 16, *Pl. XIII*, encastré par un bout, et en prenant la moyenne des flexions obtenues, en plaçant ce barreau dans les deux positions inverses T et ⊥ :

12.774.446.334,

ce qui diffère à peine de la valeur indiquée par Tredgold.

Coefficient d'élasticité des bois. — Pour les bois, les expériences de Duhamel sur des pièces de chêne d'un très-fort équarrissage conduisent à une valeur du coefficient :

$$E = 1.012.000.000.$$

Les expériences de M. Ch. Dupin sur des barreaux de bois de ebène et de bois de sapin de démolition de 25 ans de eoupe donnent :

Pour le bois de ebène. . . . . E = 1.688.000.000.
Pour le bois de sapin. . . . . E = 1.029.000.000.

Les expérienees de M. Barlow donnent :

Pour le ehêne du Canada. . . . E = 1.510.000.000.
Pour le ebène de l'Adriatique. . . E = 685.000.000.
Pour le pin rouge. . . . . E = 1.293.000.000.
Pour le sapin de la forêt de Mar, en Éeosse. . . . . E = 558.500.000.

D'après une autre série d'essais, le même auteur donne :

Pour le sapin, la valeur moyenne E = 984.000.000.

Les valeurs moyennes déduites pour les valeurs de eoefficient E, relatives au ehêne et au sapin, ne diffèrent pas extrêmement, eomme on le voit, des résultats déduits des allongements sous une traetion direete, par MM. Minard et Désormes, et par M. Ardant.

Moyen de s'assurer si les résistances à l'extension et à la compression des fibres demeurent égales entre elles. — Dans tout ee qui préeède, nous avons admis que les fibres des prismes fléchis résistaient également à l'extension et à la eompression, et que la limite d'altération de l'élasticité eorrespondait à des variations égales de la longueur primitive, en plus ou en moins. Les résistanees à l'extension et à la eompression sont certainement égales pour des variations de longueur des fibres extrêmement petites; mais eette égalité peut fort bien eesser, et eesse sans doute d'exister pour beaueoup de eorps solides, avant que l'élasticité soit altérée. Au delà de ee terme, l'égalité dont il s'agit est loin de se maintenir jusqu'à la rupture des fibres. C'est ainsi que nous avons vu que la résistanee du bois à la rupture par extension était beaucoup plus grande que la résistanee à l'éerasement, tandis que pour les pierres, les briques, les mortiers et la fonte de fer, la résistanee à l'écrasement est au eontraire beaueoup plus grande que la résistance à la rupture par extension. Pour reconnaître si les fibres d'un corps élastique résistent également à l'extension et à la compression, on peut observer les flexions d'un solide prismatique dont la section transversale ne soit pas divisible en deux parties égales et symétriques par une ligne horizontale, eneastré par un bout, ou posé horizontalement sur deux appuis. La seetion de ce solide pourra être, par exemple, un triangle, un demi-eerele, ou avoir la forme d'un T.

Tant que ce solide, posé dans deux expériences consécutives dans des positions inverses, de façon que tout ou partie des fibres comprimées dans la première expérience soient dilatées dans la seconde, et *vice versâ*, prendra la même inflexion sous des charges égales et semblablement placées, on en conclura que l'axe neutre, la ligne à laquelle aboutissent les fibres de longueur invariable n'a pas changé de position par le retournement du prisme, et qu'en conséquence, les résistances des fibres à la compression et à l'extension sont égales entre elles. Le résultat opposé conduirait à une conséquence égalment opposée, et ferait connaître quelle est celle des deux résistances à l'extension ou à la compression, qui devient prépondérante sous la charge, et pour l'inflexion que le corps a subie.

Il est en effet facile de démontrer que si la section transversale d'un solide prismatique est une surface dont la largeur, dans le sens horizontal, croît ou décroît constamment, depuis l'extrémité inférieure jusqu'à l'extrémité supérieure, et si les fibres ne résistent pas également à l'extension et à la compression, le moment d'élasticité du solide prismatique, placé dans les deux positions inverses l'une de l'autre, sera le plus grand, lorsque les fibres situées du côté où la largeur de la section transversale est la plus grande seront dilatées ou comprimées, suivant que la résistance des fibres à l'extension sera respectivement plus petite ou plus grande que la résistance à la compression (le moment d'élasticité croît lorsque l'on place la partie la plus large du solide du côté où la résistance des fibres est la plus petite). Ainsi, par exemple, si, pour un prisme à base triangulaire isoscèle, la résistance des fibres à la compression est plus petite que la résistance à l'extension, le moment d'élasticité sera plus grand, quand le prisme sera infléchi de façon que la base du triangle soit du côté de la concavité où les fibres sont comprimées, que quand cette même base sera tournée du côté de la convexité où les fibres sont étendues.

Un autre moyen de constater l'égalité ou l'inégalité de résistance des fibres à l'extension et à la compression, consiste à courber un prisme à base carrée ou rectangulaire, dans le sens perpendiculaire à deux de ses faces, de façon que les deux autres faces perpendiculaires à celles-ci demeurent planes, et à mesurer avec soin les longueurs des faces concave et convexe après l'inflexion, longueurs que l'on comparera à celle du prisme mesurée avant l'inflexion.

Expériences de Duleau sur le fer forgé. Les résistances des fibres à l'extension et à la compression demeurent égales entre elles. — M. Duleau a fait usage d'un procédé analogue à celui que nous venons d'indiquer, pour s'assurer si les fibres du fer résistaient également à

la compression et à l'extension. Ayant pris un prisme de fer à base rectangulaire, il traça sur deux faces parallèles des lignes droites équidistantes, et courba le prisme dans un sens perpendiculaire aux deux autres faces. Soit que la flexion dépassât ou non les limites de l'élasticité, les lignes tracées sur les deux faces parallèles demeurées planes restèrent droites, et leurs extrémités situées sur la face concave s'étaient rapprochées d'une quantité précisément égale à celle dont les extrémités aboutissant à la face convexe s'étaient écartées. Il est évident, d'après cette expérience, que les fibres de la face concave s'étaient raccourcies d'une longueur précisément égale à celle dont les fibres de la face convexe s'étaient allongées, que par conséquent la surface formée par l'ensemble des fibres dont la longueur n'avait pas varié était située à égale distance des deux faces concave et convexe, que l'axe neutre passait par le centre de gravité des sections transversales du prisme, et enfin, que l'égalité de résistance des fibres à l'extension et à la compression continuait à subsister, soit jusqu'à ce que l'élasticité fût altérée, soit même au delà de cette limite.

Toutes les expériences faites par d'autres auteurs sur des prismes en fer forgé, encastrés ou posés sur des appuis, et dont la section n'était pas divisible en deux parties égales par une ligne horizontale, ont aussi montré que l'inflexion des prismes demeurait la même, quand on venait à les retourner de manière à ce que la face supérieure fût placée en dessous, et *vice versâ*.

Expériences de M. Eaton Hodgkinson sur les bois. — M. Eaton Hodgkinson a fait sur des prismes en bois une expérience analogue à celle de M. Duleau sur des barres de fer forgé; il a plié suivant un arc de cercle d'un grand rayon des prismes en bois dont la section transversale était un carré d'un pouce anglais ($0^m,0254$ de côté), et la longueur d'environ $2^m,75$. Après avoir mesuré exactement la longueur du prisme dans son état naturel, il mesurait l'allongement de la face convexe, et le raccourcissement de la face concave, en tenant appliquée très-exactement sur ces faces une lame d'étain divisée à l'une de ses extrémités en fractions très-petites du pouce anglais, et dont l'épaisseur n'excédait pas $\frac{1}{70}$ de pouce anglais ($0^m,00036$).

Voici le résultat de ses expériences sur le pin jaune, le sapin de Dantzick, et le chêne de Québec.

Pour tous ces bois, le raccourcissement de la face concave a été plus grand que l'allongement de la face convexe, et les rapports de l'allongement au raccourcissement ont été comme suit :

Pour le pin jaune . . . . . . $\frac{169}{190}$.

Pour le sapin de Dantzick . . . $\frac{23}{25}$.

Pour le chêne de Québec. . . . $\frac{27}{31}$.

Dans ces expériences, l'allongement des fibres situées sur la face convexe a été jusqu'à la fraction 0,0023 de la longueur primitive pour le bois de chêne, et le raccourcissement a été jusqu'à la fraction 0,00277 de la longueur primitive pour le même bois. Ces variations de longueur dépassaient la limite de l'élasticité des solides, et, en effet, les prismes soumis à l'expérience ont tous conservé une légère courbure, quand elle a été terminée. La flèche était de 1/8 de pouce anglais pour le bois de pin, de 1/2 pouce pour le sapin, et de 1 pouce pour le chêne de Québec. Toutefois, ces flexions étaient encore bien éloignées de celles qui précèdent la rupture.

Il est facile de voir que la ligne des fibres invariables doit diviser la hauteur du prisme en parties respectivement proportionnelles aux variations de longueur des fibres des faces extérieures concave et convexe. Ainsi cette ligne, l'axe neutre, se trouve à une distance de la face convexe égale :

Aux $\frac{169}{359}$ de la hauteur dans le pin jaune.

Aux $\frac{23}{48}$ dans le sapin de Dantzick.

Aux $\frac{27}{58}$ dans le chêne de Québec.

Les forces attractives développées par l'extension des fibres devant d'ailleurs être égales aux forces répulsives développées par la compression des autres fibres, si l'on admet que les résistances des fibres étendues ou raccourcies demeurent exactement proportionnelles aux extensions et aux raccourcissements, depuis 0 jusqu'aux plus grandes variations de longueur qui ont eu lieu dans les expériences de M. Eaton Hodgkinson, on en conclut facilement que, pour des allongements et des raccourcissements égaux, les résistances respectivement développées par ces variations de longueur en sens opposés sont entre elles dans le rapport inverse du carré du rapport entre les variations de longueur des fibres situées sur les faces convexe et concave.

En effet, $\frac{n}{m}$ désignant ce dernier rapport, et a le côté de la base carrée du prisme, l'axe neutre sera situé à une distance de la face convexe égale à $a \times \frac{n}{m+n}$, et à une distance de la face concave égale à $a \times \frac{m}{m+n}$. Si C est le module d'élasticité des fibres étendues, C′ le module d'élasticité des fibres raccourcies, et ρ le rayon de courbure de la fibre de longueur invariable, la somme des forces développées par l'extension des fibres sera :

$$\frac{C}{\rho}\int_0^{a\frac{n}{m+n}} avdv = \frac{C}{2\rho}a^3\frac{n^2}{(m+n^2)}.$$

La somme des forces développées par le raccourcissement sera :

$$\frac{C'}{2\rho}a^3 \times \frac{m^2}{(m+n)^2}$$

et comme ces deux forces doivent être égales, on a :

$$\frac{C}{C'}=\frac{m^2}{n^2}.$$

De là on conclurait que, pour les trois essences de bois essayées par M. Eaton Hodgkinson, le rapport entre les modules d'élasticité des fibres allongées et raccourcies est à peu près égal à celui de 5 à 4 ; car les trois rapports $\frac{190}{169}$, $\frac{25}{23}$ et $\frac{31}{27}$ diffèrent peu l'un de l'autre, et les carrés de ces rapports diffèrent aussi très-peu de $\frac{5}{4}$.

Mais on peut objecter à ces conclusions que l'auteur tire des expériences que nous venons de rapporter, que l'élasticité du bois avait été déjà sensiblement altérée par la flexion que les prismes avaient subie, et qu'il suppose, sans aucune preuve, que la résistance des fibres, soit à l'extension, soit à la compression, est demeurée proportionnelle aux allongements ou raccourcissements pour toutes les fibres, depuis celles qui, étant très-voisines de l'axe neutre, ont subi des variations de

Digitized by Google

longueur extrêmement faibles, jusqu'aux fibres contiguës aux faces extérieures dont l'élasticité était déjà altérée.

Pour s'assurer que, pour de très-faibles variations de longueur inférieures à l'altération de l'élasticité des fibres, celles-ci résistent inégalement à l'extension et à la compression, il faudrait vérifier si des prismes à base triangulaire ou demi-circulaire, par exemple, posés sur deux appuis et légèrement chargés, prennent des flèches différentes, suivant qu'on les place dans deux positions inverses l'une de l'autre.

On sait depuis longtemps que, lorsque l'extension ou le raccourcissement des fibres des bois dépassent les limites où l'élasticité est altérée, la résistance à l'extension dépasse très-notablement la résistance à la compression. Le fait est rendu manifeste pour les charges qui occasionnent la rupture, par l'observation des deux parties d'un même prisme à base rectangulaire rompu par la flexion.

Il est très-facile de distinguer l'une de l'autre les parties de la section transversale où viennent aboutir les fibres qui ont cédé à l'extension et à la compression. Pour les premières, les deux tronçons du prisme rompu présentent sur la fracture des espèces d'aiguilles proéminentes séparées par des cavités où s'engageaient les aiguilles restées adhérentes à l'autre tronçon; pour les secondes, les sections séparées sont sensiblement unies et planes. Or, l'observation prouve que la ligne de séparation des fibres étendues et comprimées, au moment de la rupture, est beaucoup plus rapprochée de la face convexe que de la face concave; les distances respectives sont à peu près dans le rapport de 5 à 8, suivant les expériences de M. Barlow.

Expériences sur la flexion transversale des barreaux en fonte dont la section transversale a la forme d'un T, — M. Eaton Hodgkinson a fait aussi des expériences sur des barreaux de fonte dont la section transversale avait la forme ABCDEFGH, *fig.* 16, *Pl. XIII*, encastrés par une extrémité et chargés d'un poids à l'autre extrémité. En plaçant alternativement la partie large ABCD en dessus et en dessous, il a trouvé que, pour des charges incapables de produire une déformation permanente, les flèches étaient sensiblement les mêmes, quel que fût le sens dans lequel le solide était tourné. Toutefois, sauf une seule expérience sur quatre, la flexion a été un peu plus forte, lorsque la partie ABCD était en dessous, et par conséquent tournée du côté de la concavité du prisme, que lorsque cette partie était en dessus. Les différences sont devenues très-marquées et toujours dans le même sens, lorsque les charges ont été assez fortes pour altérer l'élasticité du solide. On peut donc admettre que, pour la fonte, tant que l'élas-

ticité n'est point altérée, les fibres résistent à peu près également à l'extension et à la compression. Mais au delà de cette limite, et pour des charges voisines de celles qui occasionnent la rupture, la résistance à l'écrasement est beaucoup plus grande que la résistance à l'extension, comme l'indiquent d'ailleurs les expériences directes faites pour déterminer la résistance de la fonte à l'écrasement et à la rupture. Ainsi, l'auteur ayant placé sur deux appuis distants de 4 pieds 3 pouces anglais l'un de l'autre, deux solides de la forme indiquée ci-dessus, coulés dans le même moule, et dont les dimensions étaient AB $= 4^{\text{pouces}},1$; AC $= 0^{\text{pouce}},25$; EG$= 1^{\text{pouce}},1$; GH$= 0^{\text{pouce}},25$ en mesures anglaises, et posés en sens inverse l'un de l'autre; celui qui était placé ainsi ⊥, la face large tournée du côté de la convexité, supporta jusqu'à 8 quintaux 3/4, et rompit finalement sous une charge de 9 quintaux de 112 livres, placée au milieu de l'intervalle des appuis.

La flèche du prisme fut, sous une charge de 4 quintaux, de $0^{\text{pouce}},6$; pour une charge de 8 quintaux 1/4, $1^{\text{pouce}},8$. Le solide rompit brusquement : la rupture fut seulement précédée d'une petite augmentation de la flexion. A l'instant de la rupture, un morceau de la forme ACBD, *fig.* 17, *Pl. XIII*, se détacha du milieu de la partie concave du solide, et fut lancé en l'air. La charge était placée en C. Dans le morceau de fonte détaché, on avait AB$= 4^{\text{pouces}}$, et CD$= 0^{\text{pouce}},98$. Il est vraisemblable que le point D correspondait à la ligne séparative des fibres étendues et des fibres comprimées.

L'autre barreau, placé ainsi T, porta 2 quintaux 1/4, et rompit sous une charge de 2 quintaux 1/2, qui n'est guère que le quart de la précédente. Ces expériences, dans lesquelles M. Eaton Hodgkinson s'est proposé de rechercher la forme la plus convenable à donner aux poutres en fonte, sous le double rapport de l'économie et de la solidité, sont imprimées dans le cinquième volume des *Mémoires de la Société philosophique et littéraire de Manchester.*

Limite des charges capables d'altérer l'élasticité ou de produire une flexion permanente de prismes posés sur deux appuis ou encastrés. Fer forgé. — Quant aux limites des charges capables d'altérer l'élasticité ou de produire une flexion permanente par un effort dirigé perpendiculairement à la longueur des solides, il paraît qu'elles peuvent être calculées pour le fer forgé, en partant de ce principe, que le plus grand allongement ou raccourcissement des fibres ne doit pas dépasser 0,0006 à 0,0007 de la longueur primitive, et que sous la charge permanente dans les constructions, la plus grande variation de longueur des fibres ne doit pas excéder la moitié de la fraction précédente, ou 0,0003 de la longueur primitive.

Digitized by Google

La charge capable d'altérer l'élasticité d'un prisme de fer encastré par une extrémité et chargé à l'extrémité libre, serait donc, en posant $A = \int_0^{v_1} Uv^2dv + \int_0^{v_0} Uv^2dv$, désignant par l la distance à la section encastrée, et prenant 20.000.000.000 pour le module d'élasticité du fer :

$$Q = \frac{6.000.000 \times A}{V \times l}.$$

V désignant la plus grande distance verticale du contour supérieur ou inférieur de la base du prisme au centre de gravité de cette base.

Il suffit donc de remplacer le produit E α par 6,000,000, dans les formules générales des pag. 315 à 318, pour obtenir les charges qu'on peut faire supporter à des barreaux prismatiques en fer qui auraient l'une des formes dont nous nous sommes occupés.

Bois. — Pour les bois, la limite à laquelle l'élasticité des fibres est altérée par la compression est encore fort incertaine. Quoi qu'il en soit, il paraît bien certain, par les expériences citées de M. Eaton Hodgkinson, qu'un raccourcissement de 0,0027 de la longueur primitive des fibres, dans un prisme infléchi, altère très-notablement l'élasticité, et il paraît rationnel d'admettre tout au plus comme limite supérieure de la variation de longueur le chiffre résultant des expériences de M. Ardant, c'est-à-dire 0,00117 de la longueur primitive, qui n'est que la moitié de celui que donnent les auteurs anglais. Prenant d'ailleurs pour E le nombre 1.300.000.000, qui peut être admis sans inconvénient pour le chêne, le sapin et le pin, on a E α = 1,521,000, nombre qu'il faudra substituer dans la formule générale :

$$Q = \frac{AE\alpha}{Vl}$$

pour obtenir la charge capable d'altérer l'élasticité des prismes de bois de très-bonne qualité et bien choisis, encastrés par une extrémité et chargés à l'autre. Si l'on veut d'ailleurs s'en tenir au tiers de cette charge, comme limite de celle qu'il convient de faire supporter aux bois dans les constructions, on aura pour déterminer le plus grand poids dont on puisse charger avec prudence un prisme placé dans ces conditions.

$$Q = \frac{A \times 507000}{Vl}.$$

Fonte. — Quant au fer fondu exposé à la flexion transversale, on admet généralement d'après l'autorité de Tredgold, que l'élasticité n'éprouve aucune altération pour des charges inférieures au tiers de celle qui occasionnerait la rupture immédiate. Cette assertion est combattue et réfutée par les nombreuses expériences de MM. Hodgkinson et Fairbairn, imprimées dans le sixième volume du Rapport sur les travaux de l'Association britannique, pour l'avancement des sciences, p. 337 et suivantes. L'importance du sujet, et l'ignorance où l'on est encore généralement en France, des expériences dont il s'agit, qui ont été communiquées à la réunion de l'Association britannique en 1837, nous engagent à présenter ici une analyse succincte des résultats principaux auxquelssont parvenus les deux auteurs cités. Leur but était d'abord la comparaison des fontes obtenues au vent chaud et au vent froid, sous le rapport de la ténacité absolue et de l'élasticité. Voici le tableau des résultats comparatifs obtenus pour les résistances absolues à l'écrasement et à la rupture par extension, de fontes de diverses provenances, réduits en mesures françaises.

INDICATION DU MÉTAL ESSAYÉ.	RÉSISTANCE par CENTIMÈTRE CARRÉ.		RAPPORT des deux résistances.
	à l'écrasement.	à la rupture par extension	
	kil.	kil.	
Fonte de Devon (en Écosse), nº 3, au vent chaud.	10204	1540	6,638 à 1
Fonte de Buffery, nº 1, au vent chaud.	6073	944,4	6,431 1
Fonte de Buffery, nº 1, au vent froid.	6565	1228	5,346 1
Fonte de Coëd-Talon, nº 2, au vent chaud.	5816	1172	4,961 1
Fonte de Coëd-Talon, nº 2, au vent froid.	5748	1325,5	4,337 1
Fonte de Carron, nº 2, au vent chaud.	7630	949,4	8,037 1
Fonte de Carron, nº 2, au vent froid.	7478	1173	6,376 1
Fonte de Carron, nº 3, au vent chaud.	9580	1248	7,515 1
Fonte de Carron, nº 3, au vent froid.	8116	998	8,129 1

Ces résultats diffèrent assez peu de ceux qu'ont obtenus Rennie, Tredgold, Karsten, etc., pour les fontes grises et douces. Nous renvoyous le lecteur au mémoire même, pour les détails intéressants qu'il contient sur le mode de dislocation des prismes en fonte, lors de l'écrasement, et nous passons aux expériences relatives à la flexion transversale. Ces expériences ont été faites sur des barreaux prismatiques posés horizontalement sur deux appuis et chargés au milieu. Les uns étaient à section transversale rectangulaire, d'autres à section triangulaire, d'autres, enfin, avaient la section en forme de T, représentée *fig.* 16 et 14, *Pl. XIII.*

Dans ces derniers, on avait à peu près AB = $0^m,127$; BF = $0^m,0076$ et $0^m,0041$; CD = $0^m,0394$ et $0^m,0295$; DE = $0^m,0091$ et $0^m,00635$. On a déterminé pour ces derniers, les flexions correspondantes aux charges successivement croissantes jusqu'à déterminer la rupture, en les plaçant alternativement dans la position T, de manière que la côte verticale fût étendue, et dans la position inverse ⊥, de manière que cette même partie fût comprimée. On a constaté dans chaque expérience, avec le plus d'exactitude possible, la limite inférieure de charge capable de déterminer une flexion persistante, après que la pièce avait été déchargée.

Voici les résultats obtenus :

Les pièces dont la section avait la forme d'un T, ont rompu sous des charges très-différentes et à peu près dans le rapport de 1 à 4, suivant qu'elles étaient placées dans la position T, ou dans la position inverse ⊥. Les flexions correspondantes aux charges les plus voisines de celles qui ont produit la rupture, ont été pour les prismes placés ainsi T, à peu près six fois aussi grandes que pour les prismes placés en sens inverse.

Lors de la rupture des prismes posés ainsi ⊥, un coin de la forme ABCD s'est toujours détaché du milieu de la pièce, comme dans l'expérience plus ancienne et déjà citée, du même auteur M. Hodgkinson. Le module d'élasticité, conclu des expériences faites sur les barreaux à section rectangulaire, sous des charges inférieures au tiers de celle qui a occasionné la rupture, a été de :

12.125.000.000 pour la fonte de Carron au vent froid et au coke.
11.300.000.000 pour la fonte de Carron au vent chaud et au coke.
16.070.000.000 pour la fonte de Devron (en Écosse) n° 3, au vent froid et au coke.
15.770.000.000 pour la fonte de Devron (en Écosse) n° 3, obtenue au vent chaud et à la houille crue.

La fonte de Devon est extrêmement dure, et ne peut être travaillée sur le tour et à la lime qu'avec une extrême difficulté.

Ces résultats diffèrent très-peu de ceux que l'on déduit des observations plus anciennes, déjà citées pour les fontes de diverses natures, ils n'indiquent aucune différence importante sous le rapport de la ténacité et de l'élasticité, entre les fontes obtenues au vent chaud ou au vent froid. Quant à la limite des charges capables d'occasionner une flexion persistante, après que la pièce était déchargée, limite que Tredgold pense être égale au tiers du poids qui déterminerait la rupture immédiate, MM. Hodgkinson et Fairbairn ont constaté qu'elle est beaucoup plus petite. Ainsi, un poids de 16 livres a produit une flexion permanente sensible, dans des barres prismatiques qui n'ont rompu que sous des charges de 469, 462 et 518 livres avoir-du-pois. Dans d'autres expériences faites sur des prismes plus longs et posés sur des appuis distants entre eux de 6 pieds anglais, des poids respectivement égaux à 7 et 14 livres, ont produit une flexion permanente sensible, tandis que les poids qui ont déterminé la rupture, ont été de 364 et 1120 livres. Les expériences analogues ont toujours conduit à des résultats semblables. On ne peut donc pas admettre que la limite de charge capable de déterminer une déformation permanente, soit aussi élevée qu'on le suppose : il est certain au contraire, que cette limite est très-basse, et n'est qu'une fort petite fraction de la charge qui occasionnerait la rupture, $\frac{1}{30}$, $\frac{1}{52}$ et même $\frac{1}{80}$ dans les diverses observations citées.

Nous renvoyons au mémoire original pour les expériences nombreuses faites sur les fontes de diverses autres provenances, par flexion transversale, et nous arrivons à celles de M. Fairbairn, ayant pour but de déterminer l'influence du temps sur la déformation des prismes chargés perpendiculairement à leur axe. Ces expériences devenaient d'autant plus importantes, qu'il était maintenant démontré que la limite des déformations permanentes, ou de ce qu'on appelle l'altération de l'élasticité, était plus petite.

Cette déformation devait-elle augmenter progressivement sous la charge, avec le temps, jusqu'à la rupture du solide? ou bien avait elle une limite rapprochée, et le solide déformé se constituait-il alors dans un nouvel état d'équilibre moléculaire permanent, et différent de l'état primitif? Voici ce que l'expérience a répondu :

Des barreaux de fonte fabriquée au vent froid et au vent chaud, de l'usine de Coëd-Talon (nord du pays de Galles), ayant un pouce anglais environ d'équarrissage, furent mis en charge au mois de mars 1837; ils furent posés sur des supports distants de 4 pieds 6 pouces. On ob-

serva d'abord les flèches correspondantes à de petites charges progressivement croissantes placées au milieu, puis on laissa les barreaux chargés d'un poids considérable et on mesura l'accroissement de la flèche sous ce poids, d'intervalle en intervalle, jusqu'au mois de juin 1838, époque où les résultats furent imprimés parmi les rapports de l'Association britannique qui s'était réunie en 1837 à Liverpool.

Voici les tableaux des résultats obtenus, traduits en mesures françaises :

TABLEAU N° I.

Distance des appuis, 1m,372. | Charge permanente 126k,95.

FONTE N° 2 AU VENT FROID. Hauteur du barreau. . 0,0267 Largeur. 0,0262			DATE de l'observation.	TEMPÉRATURE au moment de l'observation en degrés centigrades.	FONTE N° 2 AU VENT CHAUD. Hauteur au barreau. . 0,0267 Largeur. 0,02565			OBSERVATIONS.
Charges.	Flèches observées.	Flèches permanentes après le déchargement.			Charges.	Flèches sous la charge.	Flèches persistautes après le déchargement.	
kil.	mil.	mil.		degrés.	mil.	mil.	mil.	
25,39	3,658	»	. . . . . .	. . . .	25,39	3,886	»	L'accroissement de la flèche sous la charge de 126k.,95 a été, du 11 mars 1837 au 23 juin 1838, de 24 milli.,460 — 23,622 0.838 pour la fonte au vent froid, et de 28,118—27,026 = 1milli.,092 pour le barreau de fotne au vent chaud. La différence des températures a augmenté un peu l'influence de la charge.
50,78	7,849	0,508	. . . . . .	. . . .	50,78	8,560	0,559	
76,17	12,675	»	. . . . . .	. . . .	76,17	13,819	»	
101,56	17,983	1,905	. . . . . .	. . . .	101,56	19,914	0,224	
126,95	23,266	2,743	9 mars. 1837.	9 4/9	126,95	26,492	3,353	
Id.	23,622	»	11 mars. . .	»	*Id.*	27,026	»	
Id.	23,673	»	17 mars. . .	»	*Id.*	27,102	»	
Id.	23,622	»	15 avril. . .	8 1/3	*Id.*	27,381	»	
Id.	23,673	»	31 mai. . .	16 2/3	*Id.*	27,483	»	
Id.	23,800	»	22 août. . .	21 1/9	*Id.*	27,584	»	
Id.	23,927	»	18 novembre.	7 2/9	*Id.*	27,686	»	
Id.	23,902	»	8 janvier 1838.	3 1/3	*Id.*	27,661	»	
Id.	23,993	»	12 mars. . .	10 5/9	*Id.*	27,686	»	
Id.	24,460	»	23 juin. . .	25 5/9	*Id.*	28,118	»	

TABLEAU N° II.

Distance des appuis, 1m,572. | Charge permanente, 152k,34.

FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT FROID. Hauteur du barreau. . 0,02591 Largeur. 0,02616			DATES des observations.	TEMPÉRATURE au moment de l'observation en degrés centigrades.	FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT CHAUD. Hauteur du barreau. . 0,02591 Base. 0,02642			OBSERVATIONS.
Charges.	Flèches observées.	Flèches persistantes après le déchargement.			Charges.	Flèches sous la charge.	Flèches persistantes après le déchargement.	
kil.	mil.	mil.		degrés.	kil.	mil.	mil.	
25,39	3,619	»	. . . . . .	. . . .	25,39	4,064	»	L'accroissement de la flèche a donc été sous la charge de 152 k,34, du 11 mars 1837 au 23 juin 1838, de 33,426 — 32,258 = 1,168 pour le barreau de fonte au vent froid, et de 39,065 — 37,109 = 1,956 pour le barreau de fonte au vent chaud. L'accroissement de température a concouru avec l'influence de la charge.
50,78	8,077	0,7112	. . . . . .	. . . .	50,78	8,788	0,6604	
76,17	13,081	»	. . . . . .	. . . .	76,17	14,402	»	
101,56	18,593	2,184	. . . . . .	. . . .	101,56	20,549	2,337	
126,95	24,409	»	. . . . . .	. . . .	126,95	7,356	»	
152,34	31,013	4,878	. . . . . .	. . . .	152,34	34,900	5,3848	
Id.	32,182	»	6 mars 1837.	. . . .	»	»	»	
Id.	32,258	»	9 mars. . . .	9 4/9	152,34	36,932	»	
Id.	32,258	»	11 mars. . .	9 4/9	Id.	37,109	»	
Id.	32,283	»	17 mars. . .	9 4/9	Id.	37,134	»	
Id.	32,283	»	15 avril. . .	8 1/3	Id.	37,465	»	
Id.	32,359	»	31 mai. . . .	16 2/3	Id.	37,617	»	
Id.	32,715	»	22 août. . .	21 1/9	Id.	39,122	»	
Id.	32,664	»	18 novembre.	7 1/9	Id.	38,075	»	
Id.	32,715	»	8 janvier 1838.	3 1/3	Id.	38,151	»	
Id.	32,969	»	12 mars. . .	10 5/9	Id.	38,227	»	
Id.	33,426	»	23 juin. . . .	25 5/9	Id.	30,065	»	

TABLEAU N° III.

Distance des appuis, 1m,372. | Charge permanente, 177k,73.

FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT FROID. Hauteur du barreau. . 0,0262 Largeur 0,0259			DATES des observations.	TEMPÉRATURE au moment de l'observation en degrés centigrades.	FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT CHAUD Hauteur du barreau. . 0,0267 Base. 0,0254			OBSERVATIONS.
Charges.	Flèches observées.	Flèches persistantes après le déchargement.			Charges.	Flèches observées.	Flèches persistantes après le déchargement.	
kil.	mil.	mil.		degrés.	kil.	mil.	mil.	
25,39	3,886	0,127	. . . .	. . . .	25,39	3,810	»	Du 6 mars 1837 au 23 juin 1838, l'accroissement de la flèche a été de 46,330 — 42,774 = 3 millim. 556 pour le barreau de fonte au vent froid, et de 45,796 — 43,561 = 2 millim., 235 pour le barreau de fonte au vent chaud.
50,78	8,484	0,559	. . . .	. . . .	50,78	8,467	0,584	
76,17	13,741	»	. . . .	. . . .	76,17	13,995	»	
101,56	19,553	2,261	. . . .	. . . .	101,56	19,685	2,184	
126,95	25,730	»	. . . .	. . . .	126,95	26,137	»	
152,34	32,868	5,077	. . . .	. . . .	152,34	33,299	5,075	
177,73	41,046	7,417	. . . .	. . . .	177,73	41,529	6,904	
177,73	42,774	»	6 mars 1837.	. . . .	177,73	43,561	»	
177,73	43,028	»	9 mars. . . .	9 4/9	177,78	44,653	»	
177,73	43,028	»	11 mars. . .	9 4/9	177,73	44,704	»	
177,73	43,028	»	17 mars. . .	9 4/9	177,73	44,780	»	
177,73	43,586	»	15 avril. . .	8 1/3	177,73	44,882	»	
177,73	43,815	»	31 mai. . . .	16 2/3	177,73	44,085	»	
177,73	44,120	»	2 août. . . .	21 1/9	177,73	44,288	»	
177,73	43,790	»	18 novembre.	7 1/9	177,73	44,034	»	
177,73	43,739	»	8 janvier 1838.	3 1/3	177,73	44,034	»	
177,73	45,745	»	12 mars. . .	10 5/9	177,73	44,313	»	
177,73	46,330	»	23 juin. . . .	25 5/9	177,73	45,796	»	

TABLEAU N° IV.

Distance des appuis 1m,572. | Charge permanente 203k,12.

FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT FROID. Premier barreau. Hauteur. . . . . . 0,0254 Largeur. 0,0257			Deuxième barreau. Hauteur. . . . . . 0,0259 Largeur. 0,0262			DATES des observations.	Température au moment de l'observation en degrés centigr.	FONTE N° 2 AU VENT CHAUD. Hauteur du barreau. . 0,0264 Largeur. 0,0257		
Charges.	Flèches observées	Flèches persistantes apres le déchargement.	Charges.	Flèches sous la charge.	Flèches persistantes après le déchargement.			Charges.	Flèches sous la charge.	Flèches persistantes après le déchargement.
kil.	mil.	mil.	kil.	mil.	mil.		degrés.	kil.	mil.	mil.
25,39	3,937	»	25,39	3,277	»	. . . .	. . .	25,39	4,191	»
50,78	8,467	0,533	50,78	6,706	0,229	. . . .	. . .	50,78	9,144	0,635
76,17	13,614	»	76,17	10,566	»	. . . .	. . .	76,17	14,707	»
101,56	19,177	1,930	101,56	14,681	0,991	. . . .	. . .	101,56	21,057	2,184
126,95	25,197	»	126,95	19,152	»	. . . .	. . .	126,95	»	»
152,34	32,055	4,242	152,34	23,724	2,210	. . . .	. . .	152,34	36,043	5,283
177,73	39,522	»	177,73	28,727	»	. . . .	. . .	177,73	rupture	»
203,12	48,362	»	203,12	34,569	4,877	. . . .	. . .			
203,12	49,886	10,262	203,12	35,814	»	6 mars 1837.	. . .			
203,12	50,927	»	205,12	35,890	»	9 mars. . .	9 4/9			
203,12	50,927	»	203,12	35,890	»	11 mars. .	9 4/9			
203,12	51,054	»	203,12	35,890	»	17 mars. .	9 4/9			
203,12	51,157	»	»	»	»	. . . .	. . .			
			203,12	36,119	»	15 avril . .	8 1/3			
			203,12	36,170	»	31 mai. . .	16 2/3			
			203,12	36,525	»	22 août . . .	21 1/9			
			203,12	36,347	»	18 novembre. .	7 1/9			
			203,12	36,322	»	8 janvier 1838.	3 1/3			
			203,12	36,551	»	12 mars. . .	10 5/9			
			203,12	37,008	»	23 juin. . .	25 5/9			

Le barreau rompit au bout de 37 jours de charge.

Plusieurs autres barreaux de fonte semblables obtenus au vent chaud, rompirent immédiatement sous la charge de 203k,12.

On voit que la flèche du seul barreau qui ait résisté jusqu'à la fin, sous la charge de 203k,12, a augmenté de 37,008 — 35,814 = 1mil,194, depuis le 6 mars 1837 jusqu'au 23 juin 1838. Cet accroissement est beaucoup moindre que celui qui a été observé sous la charge plus petite de 177k,73, sur les barreaux essayés dans les expériences du tableau n° III, ce qui indique la plus grande ductilité de ces derniers barreaux. Il est à peine supérieur à l'accroissement pris sous une charge de 152k,34, dans les expériences dont le tableau n° II contient les résultats.

On peut regarder la charge de 203k,12, comme un peu inférieure à celle qui déterminerait la rupture immédiate des barreaux de fonte au vent froid soumis aux épreuves précédentes, puisque l'un des barreaux a rompu sous cette charge au bout de 37 jours, et qu'un autre l'a supportée pendant 15 mois.

Il y a eu déformation persistante sensible pour tous les barreaux essayés sous une charge égale au quart de 203k,12, et pour un des barreaux, la déformation a été perceptible sous une charge égale à 1/8 seulement de cette limite.

Sous une charge permanente égale aux 5/8 au plus de celle qui occasionnerait la rupture immédiate, la flexion d'un barreau de fonte soumis à un effort transversal a été constamment en croissant, pendant un espace de quinze mois, et il paraît évident que le prisme n'était pas encore parvenu à un état d'équilibre stable. La question de savoir si cette flexion continuera à croître avec le temps, sous cette charge, jusqu'à la rupture, ou si elle aura un terme plus ou moins éloigné demeure encore indécise, et sa solution exigerait que l'expérience eût été prolongée pendant plusieurs années consécutives.

Si d'une part l'altération prompte de l'élasticité de la fonte sous des charges très-petites, et l'accroissement graduel de la déformation sous des charges inférieures ou tout au plus égales aux 5/8 de celle qui occasionnerait la rupture, sont peu propres à faire regarder la fonte soumise à un effort transversal, comme d'un usage économique et sûr dans les constructions, d'un autre côté, les expériences du tableau n° III, où la fonte a supporté pendant quinze mois un effort à peu près égal aux 7/8 de celui qui aurait déterminé la rupture immédiate, sans que les accroissements de flexion suivissent une progression assez rapide pour permettre de penser que la rupture dût être prochaine, sont de nature à conduire à une conclusion tout opposée. En attendant la suite de ces expériences, qui sont sans doute continuées et seront publiées plus tard par leurs auteurs, et à défaut de données résultant d'observations exactes sur des constructions en fonte

suffisamment anciennes, il convient, de restreindre plutôt que d'augmenter les efforts que l'on peut sans danger faire supporter à la fonte soumise à un effort transversal, et la prudence me semble indiquer de limiter ces efforts à 1/8 au plus de ceux qui détermineraient la rupture ; c'est la moitié seulement du maximum de charge indiqué par Tredgold, et d'après lui par M. Navier.

Coefficient d'élasticité de la fonte déduit des flexions transversales. Barreaux en fonte à base carrée. — Conformément à ce principe, la charge maximum des barreaux d'un pouce anglais d'équarrissage environ, essayés par M. Fairbairn, serait fixée à $25^k,39$ seulement. La flèche moyenne prise sous cette charge par les cinq barreaux de fonte au vent froid mis en expérience, pour une distance des appuis de $1^m,372$, a été de $3^{millim.},6806$; la section moyenne des cinq barreaux avait de hauteur et de base $0^m,02602$ et $0^m,02604$; le poids du barreau de $1^m,372$ de longueur doit être très-voisin de $6^k,51$ (j'admets que le poids spécifique de la fonte est de 7000 kilogrammes). Si l'on désigne par E le coefficient d'élasticité de la fonte, l'on aura pour le moment d'élasticité du barreau :

$$M = E \times \frac{0,02604 \times \overline{0,02603}^3}{12} = 0.0000000038583 \ E.$$

La flèche étant de $3^{millim},6806$, on a la relation :

$$f = \frac{Q + \frac{5}{8}(pl)}{M} \times \frac{l^3}{3},$$

dans laquelle il faut faire $Q =$ la moitié de la charge, pl égal à la moitié du poids du barreau, et $l =$ la demi-distance des appuis; substituant les nombres, on a : $\frac{Q + \frac{5}{8}(pl)}{3} = 4_k,91$; $l = 0^m,686$; $M = 0,000000038583 \ E$; $f = 0,0036806$, et en tirant la valeur de E, il vient :

$$E = 11.165.000.000,$$

nombre qui se rapproche beaucoup des valeurs indiquées pour la fonte, d'après d'autres expérimentateurs.

Quant au plus grand allongement ou raccourcissement des fibres de la fonte, correspondant à cette flexion, dans l'hypothèse admise d'une égale résistance des fibres à l'extension et à la compression, il est exprimé en fonction de la flèche f, par la relation :

$$\alpha = \frac{3Vf}{l_2}$$

dans laquelle V est égal à la moitié de l'épaisseur du solide, et l à la demi-distance des appuis; tout calcul fait, on trouve:

$$\alpha = 0.0003058 \quad \text{et} \quad \alpha E = 3.414.257 \text{ kilogrammes.}$$

Cet allongement correspond à une traction ou compression de 3,414,257 par mètre carré de section transversale, ou de $3^k,414$ par millimètre carré de cette section.

Si l'on se rappelle que la fonte sollicitée par un effort direct de traction rompt sous uue charge de $9^k,44$ à $15^k,40$ par millimètre carré de section (*voyez* le tableau des expériences de M. Hodgkinson), on trouvera, je pense, dans ce fait, un motif de plus pour se rapprocher, dans les constructions où la fonte sera soumise à un effort transversal, de la limite indiquée dans cet article.

Prismes dont la section transversale a la forme d'un T.— Au surplus, cette règle ne doit être appliquée que dans le cas où les solides prismatiques en fonte soumis à la flexion transversale, auraient une base circulaire, rectangulaire, ou toute autre divisible en deux parties égales par une ligne horizontale. Or, ces formes sont très-désavantageuses, ainsi que le prouvent les expériences de M. Eaton Hodgkinson, parce que la fonte résiste beaucoup plus fortement à l'écrasement qu'à la rupture par extension. Il convient de concentrer la masse de la fonte du côté de la convexité des pièces infléchies, et de diminuer l'épaisseur de la pièce du côté de la concavité où les fibres résistent par compression. On y parviendra en donnant à la section transversale du solide, une forme analogue à ABCDEF, *fig.* 14, *Pl. XIII*, et tournant la face large ABCD du côté de la convexité du corps.

Voici les résultats numériques des expériences déjà citées sur deux solides de cette forme, de $2^m,13$ de longueur, posés sur des appuis distants de $1^m,981$, dans les deux positions inverses ⊥, T, et chargés au milieu.

Les dimensions de la section transversale étaient:

$AB = 0^m,1267$; $BC = 0^m,00762$; $DE = 0^m,033$; $FE = 0^m,00921$;

PIÈCE PLACÉE AINSI T,
La côte verticale du côté de la convexité.

Charges.	Flèches sous la charge.	Flèches persistantes après le déchargement.	Accroissements de la flèche correspondants à un accroissement de la charge égal à 50k,784.
kilog.	millim.	millim.	
3,174	0,381	Visible	. . . .
6,348	0,813	0,0254	. . . .
9,522	1,168	0,0508	. . . .
12,696	1,626	0,1016	. . . .
25,392	3,302	0,1270	. . . .
50,784	6,934	0,5080	7,264*
76,176	11,278	0,7112	8,688
101,568	15,697	1,4732	8,838
126,960	20,650	»	9,906
152,352	26,162	»	11,024
165,048	Rupture.	»	»

Flèche observée au moment de la rupture, 35millim.,052.

PIÈCE PLACÉE AINSI ⊥,
La côte verticale du côté de la concavité.

Charges.	Flèches sous la charge	Flèches persistantes après le déchargement.	Accroissements de la flèche correspondants à un accroissement de la charge égal à 50k,784.
kilog.	millim.	millim.	
3,174	. . . . .	non perceptible.	»
6,348	0,635	Visible.	»
9,522	1,143	0,0508	»
12,696	1,651	0,0762	»
25,392	3,404	0,127	»
50,784	6,858	0,371	6,908*
101,568	14,732	1,4732	7,874
152,352	22,733	2,5654	8,001
203,136	30,998	3,937	8,265
253,920	40,259	5,969	9,261
304,704	50,419	8,382	10,160
355,488	61,214	12,446	10,795
406,272	87,630	18,3388	»
457,056	105,156	26,416	»
482,418	. . . . .	»	»
507,840	Rupture.	»	»

Flèche observée au moment de la rupture, 122millim.,682

* Ces nombres sont le double des différences correspondantes à des accroissements de la charge de 25k,392, différences calculées d'après les résultats de la colonne nº 2.

De ce tableau, dont les résultats sont entièrement analogues du reste à ceux d'autres expériences très-nombreuses faites par le même auteur, il résulte : 1° que pour les premières charges, qui n'ont pas dépassé 25k,39 (ou un peu plus de 1/7 de la charge qui a déterminé la rupture immédiate du barreau placé ainsi T), la flexion a été la même, à peu de chose près, dans les deux barreaux semblables placés dans des positions inverses l'une de l'autre. Ainsi, jusque-là, les fibres paraissent résister également à la compression et à l'extension. Si on part en effet de cette hypothèse pour déterminer, dans le solide mis en expérience, la position de la ligne des fibres invariables, le coefficient d'élasticité et la variation de longueur maxima des fibres du solide, on trouve : que l'axe neutre est à 31millim.,9472 de distance de l'extrémité FE de la section transversale, et à 8millim.,6728 de l'extrémité AB. Partant ensuite, pour calculer le coefficient d'élasticité, des expériences faites sur le solide placé ainsi T, on voit que, pour un accroissement de charge de 6k,348 à 25k,392, ou 19k,044, l'accroissement de la flèche a été de 3,302 — 0,813 = 2millim.,489; et de là on déduit par la formule générale :

$$E = \frac{(q''-q')}{f''-f'} \frac{l^3}{3A},$$

où l'on remplace $q''-q'$ par la moitié de 19k,044, l par la demi-distance des appuis, 0m,9905, A par sa valeur numérique, qui est 0,0000001276; $f''-f'$ par 0,002489; on trouve ainsi :

$$E = 9.711.000.000,$$

valeur qui est entre celles qui résultent d'expériences faites sur des barreaux de fonte analogues à base rectangulaire; enfin l'allongement maximum des fibres, en fraction de la longueur primitive, calculé par la formule :

$$\alpha = \frac{3Vf}{l^2},$$

où l'on remplace V par 0m,0319472, f par 0,003302, et l par 0,9905, est :

$$\alpha = 0,00032.$$

Si nous avions basé nos calculs sur les expériences correspondantes faites sur le solide placé ainsi ⊥, nous aurions trouvé :

$$E = 8.991.000.000.$$

2° Au delà de cette charge de 25k,392, les deux barreaux placés en sens inverse se comportent tout différemment. Dans le premier, celui où les fibres étendues sont les plus éloignées de l'axe neutre, ou plus exactement du centre de gravité de la section transversale, les accroissements des flèches sont beaucoup plus rapides que ceux des charges, le solide marche rapidement à la rupture, qui a lieu sous une charge de 165k,48; dans l'autre solide, où les fibres les plus éloignées du centre de gravité de la section transversale résistent par compression, les flèches croissent aussi plus rapidement que les charges, mais beaucoup moins rapidement toutefois que dans le premier. Le point de rupture est également beaucoup plus éloigné; la résistance totale est quadruple. L'élasticité paraît du reste altérée, dans l'un comme dans l'autre solide, pour des charges inférieures à 25k,39.

De là il est permis de conclure que, dans les flexions très-petites, les fibres de la fonte résistent également à l'extension et à la compression, jusqu'à ce que les fibres les plus étendues ou les plus comprimées se soient allongées ou raccourcies de la fraction 0,0003 environ de la longueur primitive. Au delà de ce terme, la résistance à la compression devient prépondérante, et d'autant plus prépondérante, que la flexion augmente davantage. L'axe neutre ne passe plus par le centre de gravité de la section transversale, mais s'élève au-dessus de ce point en se rapprochant de la face concave où les fibres sont comprimées. Si les fibres étendues sont plus éloignées ou aussi éloignées du centre de gravité que les fibres comprimées, et si par conséquent elles ont déjà subi un allongement des 0,0003 de leur longueur primitive, ces fibres s'allongent encore plus rapidement sous des charges croissantes, et elles paraissent devoir se rompre sinon immédiatement, du moins au bout d'un temps qui ne serait pas indéfini sous l'action de ces charges; mais si l'inverse a lieu, si les fibres comprimées sont plus éloignées du centre de gravité de la section transversale que les fibres étendues, et si par conséquent ce sont les fibres comprimées qui se sont raccourcies des 0,0003 de leur longueur primitive sous les premières charges; leur raccourcissement, sous des charges croissantes, est ralenti par le déplacement de l'axe neutre, et, de plus, elles peuvent, ainsi que l'expérience directe le démontre bien, supporter, sans que la cohésion soit détruite par écrasement, des efforts beaucoup plus considérables que ceux qui suffiraient pour les rompre par traction. Il paraît donc certain que, malgré l'altération de l'élasticité, le solide peut alors supporter pendant un temps extrêmement

Digitized by Google

long des charges beaucoup plus considérables, dont la limite ne peut être déterminée que par des observations analogues à celles de M. Fairbairn, prolongées pendant fort longtemps, ou par l'expérience des constructions anciennes, où la fonte serait employée de cette manière. En attendant, si on admettait que cette charge est égale dans tous les cas au huitième de celle qui déterminerait la rupture immédiate, on voit qu'une poutre en fonte, dont la section transversale serait semblable à celle des barreaux mis en expérience par M. Eaton Hodgkinson, portera quatre fois plus, quand la côte verticale sera tournée du côté de la concavité, que quand elle sera tournée du côté de la convexité du solide. Il est évident d'ailleurs que, pour l'économie de la matière et la solidité, cette forme sera bien préférable à celles dans lesquelles la section transversale serait divisible en deux parties égales et symétriques par une ligne horizontale, conclusion à laquelle M. Eaton Hodgkinson avait déjà été conduit, par les expériences qu'il a publiées dans les *Mémoires de la société de Manchester*, en 1831, et qui avaient pour but de rechercher la forme la plus avantageuse pour les poutres en fonte; la *fig.* 15, *Pl. XIII*, est la section transversale faite par un plan passant au milieu de la distance des appuis, du solide qui a offert dans ces expériences la plus grande résistance pour un poids donné de fonte.

Forme de la poutre en fonte de plus grande résistance, d'après M. Eaton Hodgkinson. — Les dimensions exprimées en centimètres sont les suivantes :

AB=16centim.,94; AC=1centim.,691; FG=5centim.,92; GI=0centim.,787. l'épaisseur de la partie verticale *mn* = 0centim.,676; la hauteur verticale de la pièce=13centim.,02. La pièce posée sur deux appuis distants de 1m,372 avait une hauteur uniforme dans toute sa longueur. La partie supérieure FGIE était également de largeur uniforme; mais la partie inférieure CAB allait en se rétrécissant vers les extrémités, de manière que son contour en projection horizontale présentait la forme de deux arcs paraboliques tournés en sens contraire, et dont les sommets correspondaient au milieu de la distance des appuis.

La *fig* 13, *Pl. XIII*, est le plan de la pièce. Les deux arcs paraboliques ACB, AC'B s'appuient sur la corde AB, dont la longueur est précisément égale à la distance des appuis. La largeur maximum CC' est celle qui a été indiquée plus haut, 16centim.,94. Aux extrémités, la pièce se termine par les parties dessinées dans la figure, qui dépassant de 7centim.,62 les points A et B, sont raccordées avec les contours des arcs paraboliques, et par lesquelles le solide repose sur les deux appuis.

Cette pièce ayant un poids total de 32k,19, rompit sous une charge de 12,026k,48

La rupture eut lieu avec projection d'un coin de fonte qui se détacha du milieu de la concavité de la pièce, ainsi que le représente la *fig. 13 bis*, *Pl. XIII*, qui est une projection verticale du solide.

ef=12centim.,95; *tn*=8centim.,91; l'angle *n*=82° sexagésimaux.

(*Memoirs of the literary and philosophical Society of Manchester, second series*, vol. 5, p. 477 et 478).

Les propriétés de la fonte de fer, soumise à des forces qui tendent à la rompre par flexion, sont probablement communes à la plupart des solides fondus, tels que le laiton, le bronze, le verre, dont la roideur est considérable. Il y a lieu de croire aussi qu'elles s'étendent aux pierres, briques et mortiers dont la résistance à l'écrasement dépasse beaucoup la résistance à la rupture par extension, ainsi que cela a lieu pour le fer fondu.

Effets de la température sur la résistance de la fonte à la flexion et à la rupture.

M. Fairbairn a fait une série d'essais comparatifs sur la résistance de la fonte à la flexion à des températures croissantes, depuis celle de 16° Fahr. (8 degrés $\frac{8}{9}$ centigr. au-dessous de 0), jusqu'à celle de la chaleur rouge. Les résultats principaux qu'il a obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT FROID.
Barreau carré d'un pouce anglais 2 centim.,54 d'équarrissage posé sur deux appuis distants de 2 pieds 3 pouces (0m,6858).

Températures.	Coefficient d'élasticité.	Poids qui déterminent la rupture.	Flèches au moment de la rupture	Milieu dans lequel la rupture s'est opérée et observations
degrés centigr.		kil.	mil.	
— 3 1/3	»	385,50	10,43	En plein air.
— 2 2/9	»	406,34	12,50	*Id.*
0	»	426,14	9,73	Dans la neige fondante
0	»	433,97	10,72	*Id.*
+ 45	»	368,24	8,53	Dans l'eau chaude.
+ 88 8/9	»	338,08	7,34	Dans l'eau chaude.
Rouge visible à la lumière du jour.	»	312,49	Ne put être mesurée. Elle était fort grande.	La charge fut placée au milieu du barreau en une seule fois : la rupture eut lieu dans l'espace d'une demi-minute.
Rouge sombre orangé, visible dans l'obscurité.	»	340,66	Ne put être mesurée.	La charge mise en une seule fois détermina la rupture immédiate.

Les résultats des expériences faites sur la fonte à la température rouge ne donnent pas la mesure de la résistance à la rupture, mais une limite probablement beaucoup trop élevée.

FONTE DE COED-TALON N° 3 AU VENT FROID.
Barreaux de 2centim.,54 d'équarrissage posé sur des appuis distants de 0m,7112 et chargés au milieu.

Températures.	Coefficient d'élasticité.	Poids qui déterminent la rupture.	Flèches au moment de la rupture.	Milieu dans lequel la rupture s'est opérée et observations.
degrés centigr.		kil.		
100	»	409,96	»	Dans l'eau bouillante
100	»	427,63	»	*Id.*
315 5/9	»	411.78	»	Dans un bain de plomb fondant.
325 5/9	»	524,12	»	*Id.*

La résistance à la rupture semble augmenter avec la température, entre 100° et la température de la fusion du plomb, évaluée à 315° $\frac{5}{9}$.

FONTE DE COED-TALON N° 2 AU VENT CHAUD.
Barreaux de 2centim.,54 d'équarrissage posés sur des appuis distants de 0m,762 et chargés au milieu.

Températures.	Coefficient d'élasticité.	Poids qui déterminent la rupture.	Flèches au moment de la rupture.	Milieu dans lequel la rupture s'est opérée et observations.
degrés centigr.		kil.	mit.	
— 8 8/9	»	362,53	9,817	En plein air, par un froid très-vif.
— 4 4/9	»	372,86	10,516	En pein air.
0	»	422,83	11,074	Dans la neige fondante.
0	»	410,42	10,744	*Id.*
+ 28 8/9	»	397,51	10,693	*Id.*
de 56 2/3 à 58 8/9	»	357,02	12,344	Dans l'eau chaude.
de 85 5/9 à 86 2/3	»	260,44	11,379	*Id.*
de 87 7/9 à 91 1/9	»	335,78	11,496	En plein air.
Rouge dans l'obscurité.	»	338,27	»	

FONTE DE COED-TALON N° 3 AU VENT CHAUD.
Barreaux de 2centim.,54 d'équarrissage posés sur des appuis distants de 0m,6858 et chargés au milieu.

Températures.	Coefficient d'élasticité.	Poids qui déterminent la rupture	Flèches au moment de la rupture.	Milieu dans lequel la rupture s'est opérée et observations.
degrés centigr.		kil.		
100	»	370,73	»	Dans l'eau bouillante
315 5/9	»	377,85	»	Dans un bain de plomb fondant
315 5/9	»	415,63	»	*Id.*

Ces essais indiqueraient encore une augmentation de ténacité de la fonte, depuis la température de l'eau bouillante jusqu'à celle de la fusion du plomb.

Digitized by Google

D'après l'ensemble des résultats rapportés ci-dessus, il paraîtrait 1° que, pour des températures inférieures à celle de la glace fondante, la résistance à la rupture serait plus faible qu'à cette dernière température, et irait en diminuant avec l'abaissement de la température ;

2° Que la résistance à la rupture serait à son maximum vers la température de 0 degré, et décroîtrait sensiblement depuis ce point jusqu'à la température de l'eau bouillante;

3° Qu'au delà de ce terme, elle augmenterait de nouveau avec la température, de façon qu'elle serait plus grande à 315° centigrades qu'à 100°;

4° Qu'enfin elle serait diminuée de 12 à 13 p. 0/0 à la température correspondante au rouge sombre.

Il serait à désirer que des expériences plus nombreuses fussent entreprises à ce sujet; les conclusions précédentes ne pouvant pas encore, il s'en faut bien, être tenues pour certaines. Nous nous bornerons à remarquer qu'il serait fort extraordinaire que la résistance à la rupture ne fût diminuée que de 12 à 13 p. 0/0 à la chaleur rouge sombre, tandis que cette diminution est beaucoup plus considérale pour le fer forgé.

De la forme des solides d'égale résistance à la flexion transversale.

Nous avons vu que, pour un solide prismatique encastré par une extrémité et chargé d'un poids Q à l'extrémité libre, on avait l'équation :

$$M \frac{d^2y}{dx^2} = Q(l - x).$$

en négligeant le poids du solide lui-même.

Le rayon de courbure, qui est insensiblement égal à $\frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}}$, est donc pour le point dont l'abcisse est x, égal à $\frac{M}{Q(l-x)}$.

La plus grande fraction de la longueur primitive dont les fibres se soient allongées, dans la section transversale correspondante à l'abcisse x, est :

$$\frac{V}{\rho} = V \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{VQ(l-x)}{M}.$$

Si, au lieu de donner au solide la forme prismatique, on fait varier la section transversale avec l'abcisse x, de façon que le rapport $\frac{V(l-x)}{M}$ soit constant pour toutes les valeurs de x, il est clair que la plus grande variation de longueur des fibres, rapportée à l'unité de longueur, sera la même dans toutes les sections transversales du solide; que les fibres extrêmes seront, dans toute leur étendue, raccourcies ou allongées de la même fraction de la longueur primitive, éprouveront par conséquent des tensions ou compressions égales, et qu'ainsi la forme déterminée par la condition que $\frac{V(l-x)}{M}$ égale une quantité constante, quel que soit x, caractérisera le solide qu'on peut appeler d'égale résistance. On peut satisfaire à cette condition d'une infinité de manières différentes. Ainsi, si l'on considère d'abord un prisme à base rectangulaire, dont la base ait une largeur a dans le sens horizontal, et une hauteur b dans le sens vertical, on peut laisser la largeur a constante dans toute la longueur du solide, et faire varier la hauteur verticale b avec la distance x à la section encastrée.

Une section faite à la distance x sera toujours un rectangle ayant pour base la largeur constante a, et pour hauteur la variable b. Le moment d'élasticité sera. pour cette section, exprimé par $\frac{Eab^3}{12}$. La plus grande distance V des fibres étendues ou comprimées à l'axe neutre sera $\frac{b}{2}$. On aura don :

$$\frac{V}{M} = \frac{\frac{b}{2}}{\frac{Eab^3}{12}} = \frac{6}{Eab^2}.$$

L'équation à laquelle il faudra satisfaire sera donc :

$$\frac{6(l-x)}{Eab^2} = C,$$

où C désigne une quantité constante.

De là on tire :

$$b^2 = \frac{6(l-x)}{Ea \times C};$$

Digitized by Google

$l - x$ est la distance variable d'une section transversale à l'extrémité libre, et chargée du solide. On voit que la hauteur b, qui est nulle à cette extrémité, doit croître jusqu'à la section encastrée, comme l'ordonnée d'une parabole dont le paramètre serait égal à $\frac{6}{EaC}$. La constante C exprime d'ailleurs la fraction de leur longueur primitive dont se sont allongées ou raccourcies les fibres les plus écartées de l'axe neutre, divisée par la charge Q.

Par exemple, supposons qu'un solide en fer forgé, encastré par un bout, doive supposer un poids de Q kilogrammes à l'extrémité libre, et qu'on veuille limiter à 0,0003 de la longueur primitive la plus grande variation de longueur des fibres, on aura la constante $C = \frac{0,0003}{Q}$, et la valeur de la hauteur b, de la section sera donnée en fonction de la distance à l'extrémité libre du solide, que j'appellerai x, au lieu de $l - x$, par l'équation :

$$b^2 = \frac{6Q \times x}{E \times a \times 0,0003} \quad \text{ou} \quad b^2 = \frac{x \times Q}{1.000.000\, a},$$

en prenant $E = 20.000.000.000$.

Si, au lieu de faire varier la hauteur b' on voulait laisser celle-ci constante et faire varier la largeur a du solide, celle-ci serait déterminée en fonction de x par la relation générale :

$$a = \frac{6x}{Eb^2 \times C} = \frac{6Q \times x}{E\alpha b^2};$$

x désignant la distance à l'extrémité libre du solide, α la plus grande variation de longueur que l'on veuille faire supporter aux fibres, b la hauteur constante, et Q la charge. La projection horizontale du solide serait donc alors un triangle isocèle dont le sommet serait à l'extrémité libre, et la base à la section d'encastrement; le demi-angle au sommet de ce triangle aurait pour tangente trigonométrique :

$$\frac{a}{2x} = \frac{3Q}{Eb^2\alpha}.$$

Si la charge était uniformément répartie sur la longueur du solide, au lieu d'être fixée à son extrémité libre, on aurait, en désignant par p la charge par unité de longueur, l'équation :

$$M\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{p(l-x)^2}{2}, \text{ d'où } \frac{V}{\rho}=V\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{Vp(l-x)^2}{2M}.$$

On devrait donc avoir, pour que le plus grand allongement ou raccourcissement des fibres fût le même à une distance quelconque x de la section encastrée, l'équation :

$$\frac{Vp(l-x)^2}{2M}=\alpha;$$

α étant la plus grande variation de longueur des fibres que l'on se donne, d'après la nature du corps. Remplaçant $l-x$ par x, il vient :

$$\frac{Vpx^2}{2M}=\alpha,$$

où x représente la distance d'une section quelconque à l'extrémité libre. Si la section est un rectangle dont la base soit constante et égale à a, et dont la hauteur b varie avec la distance x, on a :

$$M=\frac{Eab^3}{12}\ V=\frac{b}{2},$$

et par suite :

$$\frac{3x^2\times p}{Eab^2}=\alpha, \text{ d'où } b^2=\frac{3p}{Ea\alpha}x^2 \text{ et } b=x\sqrt{\frac{3p}{Ea\alpha}}.$$

La section verticale du solide, par un plan longitudinal, peut être alors un triangle rectangle dont un des sommets est à l'extrémité libre du solide, et dont l'angle contigu à ce sommet a pour tangente trigonométrique :

$$\frac{b}{x}=\sqrt{\frac{3p}{Ea\alpha}},$$

ou mieux un triangle isocèle dont le demi-angle au sommet a pour tangente :

$$\frac{b}{2x}=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{3p}{\mathrm{E}a\alpha}}.$$

Si on supposait, au contraire, la hauteur b uniforme et la largeur variable avec la distance à l'extrémité libre, on aurait entre a et x la relation :

$$a=\frac{3p}{\mathrm{E}b^2\alpha}\,x^2.$$

La projection horizontale du solide serait alors limitée par deux arcs paraboliques, *fig.* 8, *Pl. XIII*, AB, AC, se touchant par leurs sommets à l'extrémité libre A du solide, tournant leur convexité l'un vers l'autre, et pour chacun desquels on aurait l'ordonnée $im=in$, correspondante à l'abscisse Ai, comptée, à partir du point A, égale à $\frac{15p}{\mathrm{E}b^2\alpha}\times\overline{\mathrm{A}i^2}$.

Formes d'un solide d'égale résistance, posé sur deux appuis. — Les formes d'égale résistance d'un solide posé sur deux appuis et chargé au milieu, ou chargé uniformément sur toute sa longueur, se déduisent sans difficulté de celles du solide encastré par une extrémité.

Dans le cas où la charge est placée au milieu, et où la largeur demeure constante, la section du solide par un plan lougitudinal et vertical, peut être formée de quatre arcs égaux de parabole, qui viennent se couper deux à deux au milieu de la distance des appuis, où la hauteur du solide est la plus grande. Si, au contraire, la hauteur est constante, la projection horizontale du solide est formée de deux triangles isocèles égaux appuyés sur une même base, qui est la largeur du solide au milieu. Le demi-angle, au sommet, aurait pour tangente trigonométrique $\frac{3\mathrm{Q}}{\mathrm{E}b^2\alpha}$; Q étant la moitié du poids placé au milieu du solide.

Si le solide est chargé de poids uniformément répartis sur sa longueur, l'équation de la courbe qu'affecte chaque moitié du solide comprise entre le milieu et l'un des appuis sera :

$$\mathrm{M}\frac{d^2y}{dx^2}=pl\,(l-x)-\frac{p\,(l-x)^2}{2};$$

l désignant la demi-distance des appuis, et x la distance au milieu du solide. On conclut de là, en désignant par V la plus grande distance des fibres au centre de gravité de la section transversale :

$$\frac{V}{\rho}=\alpha=V\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{\left[pl(l-x)-\frac{p(l-x)^2}{2}\right]V}{M};$$

ou, en remplaçant $l-x$ par x, qui représentera alors la distance d'une section transversale quelconque à l'appui le plus voisin de cette section :

$$\frac{V}{M}\left(plx-\frac{px^2}{2}\right)=\alpha.$$

Supposant que toutes les sections transversales soient rectangulaires, b étant la hauteur, et a la base d'une section quelconque, on a :

$$V=\frac{b}{2},\quad M=\frac{Eab^3}{12};$$

et l'équation précédente devient :

$$\frac{6}{Eab^2}\left(plx-p\frac{x^2}{2}\right)=\alpha.$$

si on suppose b constant,

$$a=\frac{6}{E\alpha b^2}\left(plx-p\frac{x^2}{2}\right).$$

La projection horizontale de la moitié du solide peut être alors formée par deux arcs de parabole égaux se coupant au point d'appui C, *fig.* 7, *Pl. XIII*, tournant leur concavité l'un vers l'autre, et dont les équations sont, en prenant l'axe CC' du solide pour axe des x, et l'origine au point C :

$$y=\overset{+}{\underset{-}{\text{ou}}}\frac{3}{E\alpha b^2}\left(plx-p\frac{x^2}{2}\right),$$

la largeur variable a du solide étant égale alors à $2y$, ou à :

$$\frac{6}{\mathrm{E}\alpha b^2}\left(plx - \frac{px^2}{2}\right).$$

Il est facile de voir que ces deux arcs paraboliques ont leurs sommets en A et B, à une distance x du point C, égale à la demi-distance l des appuis, de sorte qu'en les prolongeant de l'autre côté de la ligne AB, ils viendront se couper de nouveau en C' sur le second point d'appui. Le contour de la projection horizontale est donc alors formé par deux arcs de parabole qui viennent se couper aux extrémités ou sur les deux appuis, et ont leurs sommets au milieu de la longueur du solide.

Si on suppose la largeur a constante, on a :

$$b^2 = \frac{6}{\mathrm{E}a\alpha}\left(plx - \frac{px^2}{2}\right).$$

Cette équation montre que la section verticale du solide, par un plan longitudinal, peut être une demi-ellipse dont le grand axe est égal à la distance des appuis, et le demi-petit axe est égal à $l\sqrt{\frac{3p}{\mathrm{E}a\alpha}}$.

De la flexion transversale des solides lors de la mise en charge et sous l'action d'un choc.

Flexion lors de la mise en charge. — Soit un solide prismatique posé sur deux appuis, l la demi-distance des appuis. Si un poids $2Q$ est placé au milieu de la distance entre les appuis, la pièce fléchira sous l'action de ce poids jusqu'à ce que le travail moteur dû à la chute du poids soit égal au travail résistant développé par l'élasticité des fibres pendant la flexion du prisme. Appelons f la flèche totale correspondante à la fin de la descente du poids $2Q$; $2Qf$ sera le travail moteur dû à la chute du poids. Si nous désignons par φ la valeur variable de la flèche pendant la descente du poids Q, et si nous supposons que la courbe affectée par le solide, pendant la durée de la flexion, soit constamment celle qu'affecte le solide chargé d'un poids placé au milieu de la distance des appuis, la résistance du solide, dans le sens vertical, sera égale, pendant la durée de la flexion, à $\frac{3\mathrm{M} \times 2\varphi}{l^3}$, car le solide

dont la déflexion est égale à φ ferait équilibre à l'action d'un poids posé au milieu de la distance des appuis et égal à $\frac{3 \times 2M\varphi}{l^3}$, en négligeant d'ailleurs l'influence du poids du solide infléchi. Le travail résistant élémentaire développé par l'élasticité du solide, pendant que φ augmente de $d\varphi$ est donc égal à $\frac{3M \times 2\varphi d\varphi}{l^3}$, et l'intégrale de ce travail, prise depuis une flèche nulle jusqu'à une flèche égale à f est $\frac{3Mf^2}{l^3}$. On a donc, pour déterminer f, l'équation :

$$\frac{3Mf^2}{l^3} = 2Qf, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{2}{3}\frac{Ql^3}{M}.$$

Cette flèche est double de celle du solide en équilibre sous l'action du poids 2Q. Quand le solide a fléchi jusqu'à cette limite, il se relève jusqu'à ce que le travail moteur développé par l'élasticité de la pièce soit détruit par le travail résistant dû au relèvement du poids 2Q, ce qui arrivera évidemment quand la flèche sera nulle, et le prisme continuerait ainsi à vibrer, à exécuter une série indéfinie d'oscillations transversales autour de la position d'équilibre, si le mouvement ne s'éteignait bientôt par les résistances passives et la propagation de ce mouvement dans les supports et le milieu ambiant.

La durée de chaque oscillation est facile à déterminer. On a, en effet, en négligeant toujours la masse du solide infléchi :

$$\frac{2Q}{g}\frac{d^2\varphi}{dt} = 2Q - \frac{3M \times 2\varphi}{l^3}.$$

Multiplant par $d\varphi$ les deux membres de cette équation, et intégrant, il vient :

$$\frac{Q}{g}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 = 2Q\varphi - \frac{3M\varphi^2}{l^3}.$$

La constante est nulle si, pour $\varphi = 0$, on a $\frac{d\varphi}{dt} = o_1$. De là on tire :

$$dt = \sqrt{\frac{Q}{g\left(2Q\varphi - \frac{3M\varphi^2}{l^3}\right)}}\, d\varphi\,;$$

et, par l'intégration prise à partir de $\varphi = 0$ jusqu'à $\varphi = f = \frac{2}{3}\,\frac{Ql^3}{M}$, on a pour la durée de l'oscillation complète :

$$\pi\sqrt{\frac{Ql^3}{6Mg}}.$$

Ces résultats sont analogues à ceux que nous avons obtenus sur l'allongement ou le raccourcissement des prismes tirés ou pressés suivant leur axe, lors de la mise en charge ; il ne faut pas d'ailleurs perdre de vue qu'ils ne sont approchés qu'autant que la masse du solide est réellement fort petite par rapport à celle du poids 2Q, placé au milieu de la distance des appuis, et qu'ils supposent que l'action exercée sur le milieu de la pièce se transmet instantanément jusqu'à ses extrémités.

Flexion produite par un choc. — Si on suppose maintenant qu'un corps dont le poids soit égal à 2Q tombe d'une hauteur H sur le milieu d'un prisme qu'il frappera avec une vitesse égale par conséquent à $\sqrt{2gH}$, et si l'on suppose que le poids Q demeure après le choc attaché au prisme, on déterminera la flexion maximum sous l'action de ce choc, en négligeant toujours l'influence de la masse du prisme, par rapport à celle du poids Q, par l'équation :

$$2QH + 2Qf = \frac{3Mf^2}{l^3}.$$

Si la flèche f est négligeable par rapport à la hauteur H, l'équation se réduit à :

$$2QH = \frac{3Mf^2}{l^3}. \qquad (a)$$

Si on désigne par f_1 la flèche la plus grande que puisse prendre le solide, sans que l'élasticité soit altérée, par Q_1, la pression statique capable de produire cette flèche, on a la relation :

$$f_1 = \frac{Q_1}{2M}\,\frac{l^3}{3},$$

et en multipliant les deux membres par f_1 :

Digitized by Google

$$f^2_{,} = \frac{f_{,}Q_{,}}{2M}\frac{l^3}{3}.$$

En supposant $f = f_{,}$ dans l'équation (a), et remplaçant $f_{,}^2$ par la valeur ci-dessus, on a pour la plus grande valeur de 2QH que le solide puisse supporter sans altération de l'élasticité :

$$2QH = \frac{f_{,}Q_{,}}{2}.$$

Ainsi, un choc transversal mesuré par un produit 2QH, suffit pour altérer l'élasticité, lorsqu'il est égal à la moitié du produit du poids dont l'action statique altérerait cette élasticité par la flèche correspondante à ce poids. S'il était permis d'admettre que la résistance des fibres à la tension ou à la compression demeure constante jusqu'au moment de la rupture, ce qui n'est pas, les conséquences précédentes s'appliqueraient à la rupture d'un solide par un choc transversal, et l'on pourrait dire que la résistance du solide à la rupture est proportionnelle au produit du poids capable de rompre le solide par son action *statique*, multiplié par la flexion du solide qui a lieu au moment de la rupture. C'est, en effet, ainsi que les auteurs anglais évaluent la résistance des solides à un choc transversal. M. Eaton Hodgkinson a communiqué à l'Association britannique des résultats d'expériences directes sur des solides en fonte, frappés par un boulet de fonte qu'il laissait tomber de différentes hauteurs sur le prisme placé verticalement; et il paraît qu'en effet, la résistance de ces solides à la rupture par le choc a été trouvée proportionnelle au produit du poids capable de rompre le solide par son action statique, et de la flèche au moment de la rupture (*Voyez* le vol. II des *Transactions de l'Association*, contenant le compte rendu de la réunion qui eut lieu à Cambridge, en 1833).

Les résultats précédents seront de quelque utilité dans la pratique, toutes les fois que le poids ou la masse choquante seront considérables par rapport à la masse du solide considéré, ce qui est en effet le cas le plus ordinaire. La solution complète de la question, en ayant égard à la masse et aux vitesses des particules du solide, dépend de l'analyse aux différences partielles, et nous ne pouvons l'exposer ici. Nous renverrons les lecteurs désireux de l'approfondir, au second volume du *Traité de Mécanique* de M. Poisson; à l'ouvrage de M. Navier, sur les ponts suspendus, et à la *Mécanique industrielle* de M. Poncelet,

dans laquelle ce savant professeur a présenté sous une forme élémentaire, avec la clarté qui distingue tous ses ouvrages, les propriétés des solides prismatiques sollicités par des forces agissant suivant l'axe de ces solides.

Nous nous hâtons de terminer cette digression, qui a pris, presque malgré nous, une étendue considérable, pour laquelle l'importance du sujet nous servira d'excuse, par quelques notions sur les solides prismatiques encastrés par leurs extrémités, ou fléchis transversalement par des forces parallèles à l'axe, et sur la résistance des solides à la torsion.

Solide prismatique encastré par ses deux extrémités. — Soit un solide prismatique encastré par ses deux extrémités A et B, *fig.* 6, *Pl. XIII*, et chargé en son milieu d'un poids Q, l'encastrement a pour résultat de rendre horizontales les tangentes en A et B, à la courbe qu'affecte l'axe AMB du solide. Comme la tangente à cette courbe, au point qui se trouve à égale distance des deux sections encastrées, doit être évidemment aussi horizontale, on voit déjà que chaque moitié de la courbe AMB aura un point d'inflexion entre le point M et son extrémité, et à cause de la symétrie des deux moitiés MA, MB de cette courbe, les deux points d'inflexion seront situés sur une même ligne horizontale *ik*, que je prolonge jusqu'en *m* et *n*, où elle rencontre les plans verticaux des sections encastrées. De plus, les deux parties A*i* et *i*M de la moitié A*i*M de la courbe doivent être égales entre elles, de sorte que l'abaissement *b*M du point M au-dessous de la ligne M*ikn* est précisément égal à l'élévation A*m* du point A au-dessus de la même ligne. En effet, concevons que le solide prismatique AMB ait une longueur indéfinie au delà du point A et du point B, et que les prolongements indéfinis du prisme soient posés sur des appuis situés sur les prolongements de la ligne AB, à des distances toutes égales à AB. Supposons en outre que les points A et B du prisme ainsi prolongé soient aussi posés sur des appuis au lieu d'être encastrés, il est évident que si on place au même instant des poids tous égaux à Q sur le prisme, dans les milieux des intervalles de tous les appuis consécutifs, les portions du prisme fléchiront également entre les points d'appui, suivant des courbes égales entre elles, et que les points du prisme posés sur les appuis avant la charge resteront encore sur ces mêmes points, après la charge, sans s'avancer ni d'un côté ni de l'autre. De plus, les tangentes à la courbe ondulée qu'affectera le solide seront toutes horizontales aux points situés sur les appuis. Enfin, chaque partie du solide comprise entre deux appuis consécutifs sera exactement dans le même cas que si elle était encas-

trée par ses extrémités, et son axe sera précisement fléchi suivant une courbe égale à AMB. Or, dans le cas du prisme indéfini, il est évident que chaque point d'appui supporte une pression verticale égale à un des points Q, et qu'en conséquence, la résistance de chacun de ces points d'appui peut-être remplacée par l'action d'une force verticale égale à Q, et agissant de bas en haut. Le prisme indéfini a donc la même forme que s'il était entièrement libre et sollicité par une série de forces verticales égales à Q, appliquées à des distances égales à la demi-distance des sections encastrées A et B, et agissant alternativement de haut en bas et de bas en haut. Une force Q, agissant de haut en bas, serait appliquée en M; deux forces Q, agissant de bas en haut, seraient appliquées en A et B. Or, les forces qui remplacent les résistances des appuis étant égales en grandeur aux forces appliquées au milieu des intervalles qui les séparent, il est clair que la partie A*i* de la courbe A*i*M doit être égale à la partie *i*M, et que la première doit être placée par rapport à la verticale AX dirigée de haut en bas, comme la seconde l'est par rapport à la verticale M*a* dirigée de bas en haut. Donc $Ai = Mi$; donc aussi, $Am = Mb$, $ib = mi$, et $ik = 2bi = \frac{1}{2}$ AB. La distance des deux points d'inflexion *i* et *k* est égale à la demi-distance des sections encastrées.

Remarquons maintenant qu'aux points d'inflexion *i* et *k*, le sens de la courbure de l'axe du solide change, la partie A*i* tend à se relever, tandis que la partie M*i* tend à s'abaisser en dessous de l'horizontale *mn*.

Si le solide rompait en ce point, les deux sections transversales en contact se sépareraient en glissant l'une sur l'autre. Il résulte de là que l'adhérence de ces sections contiguës équivaut à un point d'appui fixe sur lequel reposerait l'extrémité *i* de la partie M*i* du solide, et sous lequel serait engagée l'extrémité *i* de la partie A*i*. La portion *i*M*k* du solide est donc dans les mêmes circonstances que si elle était entièrement isolée du reste du prisme, et si elle était simplement posée par ses extrémités *i* et *k* sur deux appuis. La courbe *i*M*k* est donc celle qu'affectuerait l'axe d'un prisme posé librement sur deux appuis dont la distance serait égale à la moitié de la distance AB des sections encastrées, et chargée au milieu d'un poids Q.

La flèche *b*M de la courbe est donc égale à 1/8 de la flèche que prendrait le solide, si, au lieu d'être encastré en A et B, il était simplement posé sur deux appuis; car la flèche est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle au cube de la distance des appuis; le plus grand allongement ou raccourcissement des fibres du prisme dans la

section tranversale passant par le point M, est la moitié de l'allongement ou raccourcissement maximum des fibres du prisme, dans le cas où il serait posé sur deux appuis, au lieu d'être encastré. En effet, le raccourcissement ou allongement maximum est, pour un prisme donné, proportionnel à la flèche et en raison inverse du carré de la distance des appuis. Ici la flèche est 1/8, tandis que la distance des appuis est la fraction 1/2 de la distance AB, fraction dont le carré est 1/4. Or, 1/8 : 1/4=1/2. Le prisme encastré peut donc supporter, pour une même dilatation ou compression des fibres, un poids double de celui que supporterait le prisme de même longueur, posé sur deux appuis.

Enfin, on remarquera que la flèche M*b* est la moitié seulement de l'abaissement du milieu du solide au-dessous de l'horizontale passant par les points A et B, et que, le rayon de courbure étant le même au point M et aux deux points A et B, le solide tend à rompre en l'un quelconque de ces trois points.

Ces résultats sont conformes à ceux que donne M. Navier, dans le résumé de ses leçons sur la résistance des matériaux. La démonstration précédente est analogue à celle qui se trouve dans l'*Essai théorique et expérimental sur la résistance du fer forgé*, par M. Duleau.

Des pièces prismatiques chargées verticalement.

Prisme encastré par son extrémité inférieure. — Soit un prisme MN, *fig.* 9, *Pl. XIII*, érigé verticalement, et encastré par son extrémité inférieure dans un plan horizontal AX. S'il est chargé d'un poids suffisant, à son extrémité supérieure, et que cette extrémité soit tout à fait libre, le prisme fléchira si la longueur est un peu considérable, ainsi que l'expérience le démontre. Supposons que le point N vienne en N', que N'A soit la verticale suivant laquelle agit le poids. Il s'agit de trouver l'équation de la courbe MN' qu'affecte l'axe du prisme fléchi et en équilibre sous une charge donnée Q.

Si nous posons $Ab = x$, $bm = y$, l'origine des axes des coordonnées étant au point A, et M étant le moment d'élasticité du prisme infléchi, nous aurons, en désignant par ρ le rayon de courbure de la courbe au point m, l'équation d'équilibre :

$$\frac{M}{\rho} = Qy.$$

Il est essentiel de remarquer que ceci ne peut s'appliquer qu'au cas où la charge Q est assez petite pour qu'il soit permis de négliger l'influence du raccourcissement des fibres, qui serait occasionné par cette charge, dans le cas où le prisme chargé ne pourrait pas fléchir. En effet, en remplaçant la force Q, qui est appliquée en N' par une force égale et parallèle appliquée en m, et par le couple dont le moment est égal à Qy, ainsi que nous l'avons fait, dans le cas du solide prismatique encastré et situé dans une position horizontale, on voit que la direction de la force transportée en M est ici sensiblement parallèle à l'axe du prisme lorsque la flexion est très-petite, ce qui est l'hypothèse admise. On ne peut donc négliger l'influence de cette force sur la variation de longueur des fibres, qu'autant qu'elle est réellement fort petite par rapport à celle qui serait capable non-seulement d'écraser, mais encore d'altérer l'élasticité du prisme par un effort direct de compression.

En supposant la flexion très-petite, on a :

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{d^2y}{dx^2},$$

(Il faut prendre ici le signe — devant $\frac{d^2y}{dx^2}$, pour que l'expression $\frac{1}{\rho}$ soit positive; car l'origine des coordonnées étant prise au point A, et les x positifs comptés dans le sens AN', $\frac{dy}{dx}$, qui est nul pour $x=o$, prend une valeur négative croissante numériquement, à mesure que x augmente, de sorte que $\frac{d^2y}{dx^2}$ est une quantité négative).

Substituant cette valeur de $\frac{1}{\rho}$, on a, pour l'équation différentielle de la courbe :

$$M\frac{d^2y}{dx^2} = -Qy.$$

Multipliant par dy, et intégrant, on a :

$$M\frac{dy^2}{dx^2} = -Qy^2 + C.$$

Pour $x=o$, on a $y=$AM $=$ la flèche de la courbe que nous appellerons

f, et $\frac{dy}{dx} = o$, condition qui détermine la constante C, qui est égale à Qf^2. L'intégrale première de l'équation est donc :

$$M\frac{dy^2}{dx^2} = Q(f^2 - y^2),$$

d'où :

$$dx = \frac{M}{Q}\frac{dy}{\sqrt{f^2 - y^2}},$$

et :

$$x = \sqrt{\frac{M}{Q}}\left(\text{arc sin } \frac{y}{f} + C\right).$$

La constante se détermine en observant que, pour $x = 0$, $y = f$; l'équation devient en conséquence :

$$x = \sqrt{\frac{M}{Q}}\left(\text{arc sin } \frac{y}{f} - \frac{\pi}{2}\right),$$

ou :

$$y = f \sin\left(\sqrt{\frac{Q}{M}}x + \frac{\pi}{2}\right).$$

Si l est la longueur totale du solide, longueur qui diffère très-peu de l'abscisse verticale AN′, lorsque la flexion est très-petite, ainsi qu'on le suppose, on doit avoir en même temps $x = l$, $y = o$, d'où :

$$\sin\left(\sqrt{\frac{Q}{M}}\,l + \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Et par conséquent :

$$\sqrt{\frac{Q}{M}}\,l + \frac{\pi}{2} = m\pi,$$

ou :

$$\sqrt{\frac{Q}{M}}\, l = \frac{(2m-1)\pi}{2},$$

m désignant un nombre entier quelconque.

La plus petite valeur de Q qui puisse maintenir la pièce fléchie s'obtiendra en faisant dans l'équation précédente : $m = 1$. Elle est en conséquence :

$$Q = \frac{M}{l^2} \times \frac{\pi^2}{4}.$$

Toute charge plus faible serait incapable de faire fléchir la pièce. L'équation de la courbe, quand on fait $m = 1$, est :

$$y = f \sin\left(\frac{\pi}{2l}x + \frac{\pi}{2}\right).$$

Si l'on prenait $m = 2$, il viendrait pour détermiuer Q :

$$\sqrt{\frac{Q}{M}}\, l = \frac{3}{2}\pi,$$

$$Q = \frac{M}{l^2} \times \frac{9}{4}\pi^2,$$

et l'équation de la courbe serait :

$$y = f \sin\left(\frac{3\pi}{2l}x + \frac{\pi}{2}\right).$$

Cette courbe coupe l'axe des x à son extrémité supérieure où $x = l$; elle vient encore le couper à une distance de son extrémité inférieure égale au tiers de l : car, pour $x = \frac{l}{3}$, on a :

$$\frac{3\pi}{2l}x + \frac{\pi}{2} = \pi, \text{ et } \sin\left(\frac{3\pi x}{2l} + \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Enfin, on a $y = f$ pour $x = 0$, et $y = -f$ pour :

$$x = \frac{2}{3}.$$

L'axe du solide coupe donc une seconde fois la verticale passant par son extrémité supérieure, et a la forme $N'N_1NbM_1$. Le plus petit poids qui puisse faire fléchir le solide de cette manière est égal à neuf fois celui qui suffirait pour le fléchir suivant la forme MmN'.

On déterminera de même les formes des courbes correspondantes aux hypothèses $m=3,4$, etc., et les limites inférieures des charges capables de fléchir le solide suivant ces courbes.

Prisme dont les extrémités sont assujetties à demeurer sur la même verticale, pendant la flexion. — Si on suppose les extrémités du prisme assujetties à demeurer sur une même verticale, l'équation différentielle de la courbe sera la même que dans le cas précédent. En prenant pour axe des x la verticale AB *fig.* 10, *Pl. XIII*, et l'origine en A, l'intégration donne, en observant que pour $y=f$ on a $\frac{dy}{dx}=0$, et que l'on a $y=0$ pour $x=0$:

$$y = f \sin \sqrt{\frac{Q}{M}}\, x.$$

La condition que $x=l$ pour $y=0$ donne ensuite :

$$\sqrt{\frac{Q}{M}}\, l = m\pi\,;$$

la forme AB, *fig.* 10, convient au cas où $m=1$. L'équation est :

$$y = f \sin \frac{m\pi}{l}\, x.$$

Le poids le plus petit capable de maintenir la pièce fléchie est :

$$Q = M \times \frac{\pi^2}{l^2}.$$

La forme ACB, *fig.* 11, composée de deux parties égales, convient au cas où $m=2$. L'équation de la courbe est :

$$y = f \sin \frac{2\pi}{l}\, x,$$

Le poids le plus petit capable de produire une flexion de ce genre est $M \times \frac{4\pi^2}{l^2}$, quadruple du précédent.

La forme ACDB, *fig.* 12, qui coupe la ligne AB en quatre points, correspond à $m = 3$, etc.

On voit que pour faire fléchir une pièce dont les deux extrémités sont assujetties à demeurer sur la même verticale, il faut une charge quadruple de celle qui suffit pour fléchir une pièce dont l'extrémité supérieure est libre, et qui est encastrée par son extrémité inférieure.

On remarquera qu'une pièce chargée verticalement doit être rompue au bout de peu de temps sous une charge capable de la faire fléchir; car l'équilibre d'une pièce ainsi infléchie n'est point un équilibre stable, mais un équilibre indifférent. En effet, la même charge qui est capable de maintenir la pièce sous une flexion quelconque, peut aussi la maintenir sous une flexion plus grande ou plus petite, parce que le moment de la charge, par rapport à la section où le rayon de courbure est le plus petit, croît précisément proportionnellement à la flèche, la charge demeurant constante.

Les pièces chargées verticalement sont ordinairement de forme cylindrique ou carrée. On emploie principalement de cette manière la fonte de fer, sous forme de colonnes creuses, et les bois équarris ou simplement écorcés. C'est ainsi qu'on les emploie dans les mines. Le sens de la flexion de la pièce est déterminé, ou par un défaut de solidité dans quelque partie de la pièce, tel que les nœuds dans les bois, des vices de moulage dans la fonte, ou bien par le fait que la charge, au lieu d'agir suivant l'axe du solide, agit latéralement à cet axe, ce qui diminue beaucoup la résistance de la pièce. Les poteaux ou étais de bois isolés que l'on emploie si fréquemment dans les excavations souterraines, sont principalement dans ce cas.

Résultats d'expériences sur la flexion des prismes chargées verticalement. — Suivant M. Navier, qui se fonde principalement sur des expériences faites par Rondelet sur le bois, et par G. Rennie sur la fonte, les formules précédentes donnent un résultat trop faible pour les bois, lorsque la longueur n'est pas plus grande que vingt fois l'épaisseur, les prismes cédant alors plutôt par écrasement que par flexion transversale. En évaluant à 3 kilogrammes par millimètre carré le poids capable d'écraser un prisme de bois dont la longueur est égale à une ou deux fois l'épaisseur, le poids capable d'écraser un prisme dont la longueur sera égale à douze fois l'épaisseur, sera les 5/6 du précédent, ou 2 kilogrammes 1/25, et il suffira d'un poids de 1 kilogramme 1/2 pour écraser le prisme, si sa longueur est égale à vingt-quatre fois l'épaisseur.

Pour le fer fondu, la résistance à l'écrasement étant évaluée à 100 kilogrammes par millimètre carré pour le cube, serait réduite aux 2/3 ou à 66 kilogrammes, pour un prisme d'une longueur égale à quatre fois l'épaisseur, à moitié, ou 50 kilogrammes pour un prisme d'une longueur égale à huit fois l'épaisseur, et au quinzième ou 7 kilogrammes environ, quand la longneur est égale à trente-six fois l'épaisseur.

M. Navier conseille d'ailleurs de réduire, dans les applications, la charge réelle à 1/10 de celle qui a été calculée par les règles précédentes ou par les formules pour les bois, et à 1/4 ou 1/5 pour la fonte de fer.

De la résistance des solides à la torsion.

Principes d'après lesquels on calcule la résistance à la torsion. — Si un solide prismatique encastré par une extrémité, est soumis à l'action d'un système de forces agissant dans un plan normal à l'axe du solide et qui tendent à le tordre, les fibres du solide se contournent autour de la fibre qui occupe l'axe du corps, et qui demeure invariable. Si la section extrême dans le plan de laquelle sont appliquées les forces, a tourné d'un angle fini a, par rapport à la section encastrée qui est demeurée fixe, cet angle a, qu'on appelle l'angle de torsion, sera uniformément réparti sur la longueur entière du solide, de sorte que le déplacement relatif de deux sections transversales infiniment voisines du solide, sera proportionnel à l'angle a et en raison inverse de la longueur totale que j'appellerai l. Comme la résistance à la torsion doit être identique dans toutes les sections du solide, et doit faire équilibre au système des forces qui tendent à produire la torsion, il suit de là que l'angle de torsion est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à la longueur du solide prismatique homogène, ce qui est confirmé par l'expérience. Elle apprend en outre, que pour des torsions qui ne dépassent pas les limites d'élasticité du solide, l'angle de torsion croît proportionnellement au moment des forces appliquées, par rapport à l'axe du solide, ce qui montre que la résistance à la torsion est proportionnelle au déplacement angulaire relatif de deux sections infiniment voisines. Or, les particules des fibres parallèles à l'axe du corps et qui étaient primitivement en ligne droite, subissent des déplacements relatifs proportionnels à leurs distances à l'axe du solide, et il est naturel d'admettre que la résistance de chaque fibre est proportionnelle à sa section transversale et à la déviation relative de

ses particules, dans le sens du mouvement produit par la torsion. Si donc on désigne par t un coefficient numérique constant pour chaque corps, par $d\alpha$ la section transversale infiniment petite d'une fibre, par r la distance de cette fibre à l'axe du solide tordu, a désignant d'ailleurs l'angle de torsion correspondant à une longueur l du solide, la déviation relative des particules de la fibre considérée, dans deux sections infiniment voisines sera évidemment proportionnelle à $\frac{ra}{l}$, et la résistance de cette fibre sera exprimée par $t\,\frac{ra}{l}\,d\alpha$.

Le moment de cette résistance par rapport à l'axe sera égal à $t\,\frac{r^2a}{l}\,d\alpha$, et l'intégrale $\int t\,\frac{r^2a}{l}\,d\alpha$, étendue à tous les éléments superficiels d'une même section transversale du solide, exprimera la somme des moments des résistances des fibres à la torsion. PR désignant la somme des moments des forces qui produisent la torsion, l'équation d'équilibre sera :

$$PR = \int \frac{ta}{l}\,r^2 d\alpha = \frac{ta}{l}\int r^2 d\alpha,$$

en faisant sortir du signe $\int$ les quantités invariables t, a et l.

Tige cylindrique à base circulaire. — Soit par exemple un cylindre à base circulaire, dont le rayon soit égal à r_1. La section transversale sera le cercle de rayon r_1; en décomposant ce cercle en une infinité de zones annulaires, limitées par des circonférences de cercle concentriques, infiniment rapprochées, toutes les fibres aboutissant à une même zone seront équidistantes de l'axe. Si r est la distance variable d'une zone à l'axe, dr la largeur de cette zone dans le sens du rayon, $2\pi r dr$ sera la surface infiniment petite de cette zone, et la somme des sections de toutes les fibres qui y aboutissent et pour lesquelles la vlaeur de r est la même ; on aura donc : $\frac{ta}{l}\int r^2\,d\alpha = \frac{ta}{l}\int_0^{r_1} 2\pi r^3 dr$,

l'intégrade devant être étendue jusqu'à la circonférence limite du corps dont le royon est r_1. L'intégration donne : $\frac{ta}{l} \times \frac{2\pi r_1^4}{4}$, et l'équation d'équilibre est : $PR = \frac{ta}{l} \times \frac{\pi r_1^4}{2}$.

Formule applicable à un prisme à base quelconque. — Pour un prisme dont la section transversale serait une surface limitée par une courbe quelconque dont l'équation polaire serait $r = f(\varphi)$, on a : $d\alpha = r dr d\varphi$, et l'intégrale $\int r^2 d\alpha$ étendue à la surface entière, devient :

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{f(\varphi)} r^2 dr = \frac{1}{4}\int_0^{2\pi} [f(\varphi)]^4 d\varphi.$$

Prisme à base carrée. — Pour un prisme à base carrée dont le côté sera égal à b, on considérera séparément les huit triangles égaux formés par les deux diagonales, et les deux perpendiculaires aux côtés du carré, et ces côtés. Le moment de la résistance à la torsion pour le prisme, sera évidemment huit fois le moment de la résistance d'un seul triangle. Considérant un des triangles BOI par exemple, *fig.* 18, *Pl. XIII*, l'équation polaire du côté BI est $r = \frac{b}{2\cos\varphi}$, en comptant l'angle φ à partir de la perpendiculaire OI abaissée du point O sur le côté AB, et l'angle φ devant varier depuis o jusqu'à $+\frac{\pi}{4}$. Le moment de la résistance à la torsion d'un des triangles est donc :

$$\frac{1}{4}\,\frac{ta}{l}\int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{b^4}{16\cos^4\varphi}\,d\varphi,$$

et le moment de la résistance du prisme est :

$$\frac{ta}{l}\int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{b^4}{8\cos^4\varphi}\,d\varphi = \frac{tab^4}{6l},$$

car on a :

$$\int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{d\varphi}{\cos^4\varphi} = \frac{4}{3}.$$

Le moment de la résistance à la rupture du cylindre inscrit dans le

barreau à section carrée, serait : $\frac{\pi \times tab^4}{32l}$. Le rapport des moments des résistances à la torsion, dans le barreau prismatique à base carrée et le cylindre inscrit, est donc celui de 1 à $\frac{3\pi}{16}$.

Expériences de Duleau. Valeur du coefficient t. Fer forgé. — Des expériences de M. Duleau sur des fers ronds et carrés de diverses provenances, principalement des départements de la Dordogne et de l'Arriège, on conclut que la valeur moyenne du coefficient t serait de :

115.410.000 pour les fers ronds.
96.180.000 pour les fers carrés.

M. Navier attribue cette différence dans les résultats, principalement à la diversité de qualité des fers, mais aussi, en partie, à ce que les formules adoptées représentent mieux les effets naturels dans les expériences sur les fers ronds, que dans celles sur les fers carrés. On n'a point, à ma connaissance, d'expériences sur la torsion des bois et de la fonte de fer.

Résistance à la rupture par torsion. — Un solide soumis à un effort de torsion, rompt lorsque l'écartement des particules les plus écartées les unes des autres, ne peut plus augmenter sans occasionner la rupture, la rupture commence évidemment par les fibres les plus écartées de l'axe du prisme. En admettant, ce qui n'est sans doute pas rigoureusement exact, que la résistance des fibres reste, jusqu'à l'instant de la rupture, proportionnelle au déplacement relatif des particules, dans deux sections transversales infiniment voisines, il sera facile de calculer la résistance du prisme à la rupture occasionnée par la torsion. Si en effet on désigne par T la plus grande résistance à la torsion rapportée à l'unité superficielle, celle qui a lieu à l'instant qui précède la rupture, par r_1 la distance des fibres les plus éloignées de l'axe, et par r la distance variable d'une fibre quelconque à l'axe, $\frac{Tr}{r_1}d\alpha$ sera la résistance de la fibre située à la distance r de l'axe, dans l'instant qui précède la rupture. Si donc on désigne par PR la somme des moments des forces capables de rompre le prisme, on aura :

$$PR = \int \frac{Tr^2}{r_1}\,d\alpha = \frac{T}{r_1}\int r^2 d\alpha,$$

l'intégrale étant étendue à la section transversale entière du prisme.

On voit que cette expression ne diffère de celle qui représente le moment de la résistance à la torsion, qu'en ce que $\frac{ta}{l}$ y est remplacée par $\frac{T}{r_1}$.

On verra ainsi que pour un cylindre à base circulaire de rayon r_1, le moment de la résistance à la rupture est :

$$PR = \frac{T \times \pi r_1^3}{2}.$$

Pour le prisme à base carrée circonscrit à ce cylindre, on aurait :

$$PR = \frac{T \times 8r_1^3}{3\sqrt{2}};$$

le rapport des résistances à la rupture par torsion, pour le cylindre et le prisme à base carrée circonscrit, est donc celui de $\frac{\pi}{2}$ à $\frac{8}{3\sqrt{2}}$ ou $\frac{3\pi\sqrt{2}}{16}$ à 1.

Pour un tuyau creux cylindrique à base circulaire, dans les rayons intérieur et extérieur seraient respectivement désignés par r_0 et r_1, on aurait :

$$PR = \frac{T}{r_1} \times \frac{\pi}{2}(r_1 - r_0^4).$$

Valeur de la constante T *pour le fer forgé et la fonte.* — La constante T doit être déterminée par des expériences dans lesquelles on connaît le moment PR des forces qui occasionnent la rupture.

Pour le fer fondu elle peut être prise égale à 41,360,000, soit 40,000,000, d'après les expériences de Rennie, citées dans les leçons de M. Navier.

Deux expériences de M. Rennie, sur des barreaux en fer forgé, citées également dans l'ouvrage de M. Navier, conduiraient à une valeur de la constante T, peu supérieure à la précédente ; nous pensons, en conséquence, qu'on pourra sans inconvénient adopter la même valeur du coefficient T pour la fonte et le fer forgé. D'après des expé-

riences de MM. Bramah sur des barreaux carrés en fer fondu, la valeur moyenne du coefficient T serait beaucoup plus faible que celle que nous avons indiquée ci-dessus, et égale seulement à 25,860,000, soit 26,000,000.

En adoptant la valeur de T = 40,000,000, une barre de fer ou de fonte carrée de 5 centimètres de côté, serait rompue par torsion sous l'action de forces dont le moment par rapport à l'axe de la barre serait égal à 1182. En prenant T = 26,000,000, le moment des forces capables d'occasionner la rupture serait égal seulement à 768,3. Pour une barre de fer ou de fonte de 2 centimètres 1/2 de côté, le moment des forces qui occasionnerait la rupture serait égal à 148 ou 96, suivant qu'on prendra T = 40,000,000, ou 26,000,000.

On ne pourrait pas dépasser dans la pratique, avec prudence, le quart ou le cinquième des efforts indiqués ci-dessus. Cette règle peut servir à calculer les efforts de torsion que peuvent supporter les tiges de sonde, et justifie les limites que nous avons indiquées dans le chapitre relatif au sondage.

MURAILLEMENT DES GALERIES.

Dans quels cas le muraillement est préférable au boisage. — Le muraillement est bien préférable au boisage, toutes les fois que la galerie dont on veut soutenir les parois doit avoir une très-longue durée, et que l'on peut se procurer, sans de trop grandes dépenses, les matériaux nécessaires. L'expérience apprend, dans chaque localité, la durée moyenne des bois de revêtement, et l'on peut, en ayant égard à cette durée, aux prix comparés des revêtements en bois et en maçonnerie, au temps pendant lequel la galerie doit probablement demeurer ouverte, déterminer quel est le mode de revêtement qu'il convient d'adopter. Nous citerons comme exemple la règle suivie, d'après Thürnagel, dans le district des mines de Tarnowitz, en Silésie (*Arch.*, volume IX, page 153). On sait par expérience que, dans la mine dite *Friedrichs Grube*, un boisage placé dans les endroits secs ne dure pas moyennement plus de quatre ans. Les frais d'entretien ou de réparation deviennent plus considérables d'année en année, et les puits ou galeries où l'on n'avait d'abord placé que des cadres distants les uns des autres, avec bois de garnissage, finissent par être boisés à cadres contigus. Or, le prix d'un revêtement en maçonnerie est à peu près le triple du revêtement en bois. On adopte donc

le muraillement de préférence pour toutes les excavations qui doivent demeurer ouvertes pendant douze ans, au plus.

Le muraillement est d'ailleurs indispensable, et ne peut être remplacé par le boisage :

1° Dans les parties de galeries qui sont creusées dans des terres tout à fait meubles, telles que des argiles sujettes à être pénétrées d'eau. Les parties voisines de l'orifice de beaucoup de galeries d'écoulement sont dans ce cas ;

2° Dans les galeries ouvertes dans un terrain très-aquifère, lorsque le revêtement a pour but non-seulement de soutenir le terrain, mais encore de contenir les eaux. Ce cas se présente assez rarement dans les mines ;

3° Dans les galeries à grande section exécutées sur les tracés des chemins de fer ou des canaux de navigation ;

4° Dans les excavations souterraines où l'on place des foyers d'aérage, ou des chaudières de machines à vapeur, parce que les boisages seraient exposés à prendre feu.

Matériaux employés. Forme des revêtements en maçonnerie. — Les matériaux employés pour le muraillement des galeries, sont la pierre brute ou simplement dégrossie, les briques, le moellon piqué, très-rarement la pierre de taille. Dans beaucoup de circonstances, un muraillement en pierres sèches suffit. On se borne à garnir les vides de pierrailles et de mousse. On fait d'ailleurs usage de mortiers plus ou moins hydrauliques, ou de ciments, pour lier les pierres, lorsque le terrain exerce une grande poussée, ou que l'on veut contenir les eaux.

On ne doit laisser subsister aucun vide derrière les revêtements en maçonnerie, entre ceux-ci et le terrain. Quand on a satisfait à cette condition essentielle, les revêtements sont pressés sur tous les points de leur surface extérieure, et ne peuvent être détruits qu'en tombant dans le vide intérieur de la galerie. Il résulte de là que les conditions de stabilité des constructions souterraines en maçonnerie sont très-simples et diffèrent beaucoup de celles qui sont relatives aux constructions du même genre établies à la surface du sol.

Dans les terrains ordinaires, qui n'exercent pas une forte poussée, et lorsqu'il est nécessaire de soutenir à la fois le faîte et les deux parois d'une galerie, le muraillement consiste presque toujours en une voûte demi-circulaire ou en plein cintre, reposant sur deux murs verticaux bâtis le long des parois. Les fondations de ces murs sont creusées sur une petite profondeur dans le sol de la galerie, lorsqu'on a lieu de craindre que, par suite de la poussée latérale du terrain ou de la nature

nuie et glissante du sol, les murs latéraux ne viennent à être renversés en glissant sur leur base.

Quand le sol de la galerie est compressible, il pourrait arriver que les murs latéraux vinssent à s'enfoncer; en même temps que le terrain compris entre eux se gonflerait par suite de la pression du terrain latéral. Dans l'un et l'autre cas, il en résulterait l'obstruction partielle ou complète de la galerie. Pour parer à cet inconvénient, on emploie l'un des moyens suivants: 1° on élève les murs latéraux sur un plancher formé de madriers jointifs en bois de chêne, d'une épaisseur de 5 à 8 centimètres, *fig.* 9, *Pl. XII*; 2° on établit sur ce même plancher, et entre les murs un radier en forme de voûte renversée, *fig.*12, *Pl. XV*; 3° enfin on construit une voûte elliptique entièrement fermée, dont le grand axe est vertical et le petit axe horizontal, *fig.* 8, *Pl. XII*. Le premier moyen convient dans le cas où la galerie a une petite section, où la poussée latérale du terrain est faible, et ne donne pas lieu de craindre le glissement des murs latéraux sur le plancher qui les supporte Le second et le troisième conviennent dans le cas où les galeries ont de grandes dimensions, ou bien lorsque la poussée du terrain est considérable; dans ce dernier cas surtout, une voûte elliptique complète est la forme la plus convenable. Néanmoins, pour ne pas trop rétrécir le bas de la galerie, on peut tronquer l'ellipse à sa partie inférieure, et remplacer celle-ci par un radier en voûte renversée d'un rayon suffisamment grand, pour conserver la largeur nécessaire. On rentre alors à peu près dans la forme représentée *fig.* 11, *Pl. XV*.

Il arrive fréquemment dans l'exploitation des filons très-inclinés, qu'il suffit, pour maintenir la galerie ouverte, de construire au faîte une simple voûte sur laquelle reposent les déblais stériles qui restent dans les excavations après l'enlèvement des minerais utiles. Ces voûtes reposent sur les épontes du filon qui ont une solidité suffisante pour ne pas s'ébouler; elles sont en plein cintre, ou en arc de cercle, suivant que la solidité des épontes est complète, ou que la voûte doit contribuer à soutenir celles-ci, ou du moins le toit du gîte, en même temps qu'à porter les déblais qui sont au-dessus de la galerie.

Enfin on construit aussi, dans certains cas fort rares, des voûtes surhaussées ou en ogive, ou des demi-voûtes qui doivent consolider à la fois le faîte et l'une des parois latérales de la galerie.

Conditions de stabilité des voûtes et des revêtements souterrains en maçonnerie. — Examinons brièvement les conditions de stabilité particulières des maçonneries souterraines.

Soit d'abord une voûte demi circulaire ou en plein cintre, *fig.* 8 *Pl. XV*, dont ADB, *adb* sont les surfaces d'intrados et d'extrados repo-

sant sur des murs verticaux aM, bN, ou bien sur des coussinets taillés dans une roche solide. Si cette voûte est chargée de déblais, le poids de ces déblais sera incomparablement plus grand que le poids de la voûte elle-même, et l'on pourra supposer, sans erreur sensible, que la charge est uniformément répartie sur la projection horizontale de la surface d'extrados de la voûte. Désignant par p la charge par unité superficielle de cette projection, et menant deux rayons Cm, Cm', formant des angles égaux de part et d'autre avec le rayon vertical Cd, la charge sur la surface cylindrique qui a pour base l'arc mm' et une longueur égale à l'unité linéaire sera égale à :

$$2pr \sin\theta.$$

r désignant le rayon Cm, et θ l'angle $mCd = m'Cd$. Cette force doit être censée appliquée suivant le rayon vertical dC. Si on la décompose en deux forces perpendiculaires aux plans de joint mn, $m'n'$, chacune des deux composantes sera égale à pr.

En effet, prenant une longueur arbitraire xy sur le rayon vertical dC pour représenter la force $2pr \sin\theta$, et construisant le parallélogramme $xzyv$, dont les côtés xz, xv sont perpendiculaires à mn et $m'n'$, xz et xv représenteront les pressions sur les plans de joint. Or, on a :

$$xz = xv = \frac{1}{2}\,\frac{xy}{\cos zxy} = \frac{1}{2}\,\frac{xy}{\sin\theta}.$$

Et en remplaçant xy par $2pr \sin\theta$, il vient :

$$xz = xv = pr.$$

L'angle θ ayant disparu de l'expression précédente, il en résulte que la pression est la même sur tous les plans de joint, et qu'elle augmente proportionnellement au rayon de la courbe d'extrados. Il suffit, pour que la voûte ne puisse pas être détruite, que son épaisseur soit suffisante, eu égard à la résistance des matériaux dont elle est formée, pour que ces matériaux ne soient pas écrasés sous la pression calculée ci-dessus; car il est impossible que la voûte soit détruite par le renversement en dehors des parties voisines des naissances, puisque le terrain lui offre une résistance indéfinie.

On remarquera que le résultat serait absolument le même, si l'on supposait la pression sur la voûte dirigée en chaque point perpendiculairement à la surface d'extrados supposée circulaire, comme cela aurait

Google

lieu si la voûte supportait un liquide; car, p désignant toujours la pression sur l'unité superficielle, $prd\alpha$ serait la pression normale supportée par un élément longitudinal de la voûte dont la longueur serait égale à l'unité linéaire, et qui aurait pour base l'arc de cercle embrassé par un angle infiniment petit $d\alpha$. Cette pression normale, à la surface cylindrique, peut être décomposée en deux : l'une horizontale et égale à $prd\alpha \sin \alpha$, α désignant l'angle que le rayon aboutissant à l'élément que l'on considère forme avec le rayon vertical; l'autre verticale agissant de haut en bas et égale à $prd\alpha \cos \alpha$. Si on considère l'arc embrassé par deux rayons équidistants de celui qui aboutit au sommet de la voûte, les composantes horizontales se détruisent, comme étant deux à deux égales et de signes contraires, et la résultante de toutes les pressions se réduit à une force verticale agissant suivant le rayon qui aboutit au sommet de la voûte et égale à $2 \int_0^\theta pr \cos \alpha d\alpha = 2pr \sin\theta$, θ désignant le demi-angle au centre sous-tendu par le bandeau de voute considéré.

Quant aux pieds-droits AM, BN, si ce sont des murs verticaux, il faut, pour l'équilibre, qu'ils ne puissent ni être écrasés par la pression verticale qu'ils supportent, pression égale à celle d'un joint quelconque de la voûte, ni rejetés en dedans de la galerie, en glissant sur leur base par la pression latérale du terrain. La première condition sera satisfaite évidemment, s'ils sont construits avec les mêmes matériaux que la voûte, et ont une épaisseur égale à la sienne. Quant à la seconde, elle sera souvent satisfaite en même temps que la première; mais quand la poussée latérale du terrain approche de la pression verticale exercée sur la voûte en berceau, il faut donner plus d'épaisseur aux murs verticaux, ou mieux adopter le muraillement en voûte elliptique complète, ou en voûte elliptique tronquée en bas, avec radier au sol de la galerie.

Le raisonnement qui nous conduit à la détermination de la pression sur les plans de joint d'une voûte demi-circulaire étant indépendant de l'angle θ, sous-tendu par le bandeau de voûte considéré, s'applique sans difficulté à un berceau de voûte cylindrique dont la base serait une courbe quelconque; car un élément longitudinal de cette voûte se confond avec l'élément longitudinal d'une voûte circulaire, dont le rayon serait égal au rayon de courbure de la base de la voûte au point considéré. Ainsi la pression sur un plan de joint dans une voûte cylindrique quelconque, qui supporte des pressions normales en chaque point à la surface d'extrados, est égale à la pression sur l'unité superficielle multipliée par le rayon de courbure de la courbe d'extrados au

point où aboutit le plan de joint considéré. Ainsi, dans une voûte elliptique qui serait uniformément pressée sur son contour, les pressions sur les plans de joint seraient les plus grandes aux extrémités du petit axe, et les plus faibles aux extrémités du grand axe. En supposant la pression uniformément répartie sur toute l'étendue du plan de joint, on serait conduit à faire varier l'épaisseur de la voûte proportionnellement aux rayons de courbure. Il en résulterait que les épaisseurs aux extrémités des deux axes seraient inversement proportionnelles aux cubes de ces axes (1).

Dans le cas où une voûte est appuyée sur les deux épontes d'un filon dont le plan forme un petit angle avec la verticale, cette voûte doit résister à la fois à la charge des déblais ou du terrain ébouleux qui presse directement sur elle, et à la pression du toit du filon qu'elle contribue à soutenir. Si la voûte est assez peu chargée par dessus, et si la pression du toit est considérable, elle peut déterminer la rupture de la voûte, en poussant en dedans les naissances, et soulevant légèrement les parties voisines de la clef.

Soit, par exemple, *fig. 7, Pl. XV*, une voûte demi-circulaire ABDA'B', supposons que la partie voisine de la naissance AB soit pressée de dehors en dedans par l'action des roches sur lesquelles elle repose le toit d'un filon par exemple. Il peut arriver qu'un joint, tel que MN, s'ouvre à l'extrados sur les reins de la voûte, et qu'un joint DE au sommet de la voûte, s'ouvre au contraire à l'intrados. La portion ABMN voisine de la naissance, sera jetée en dedans de la galerie en tournant autour de l'arête de l'intrados N, tandis que la partie NMDE sera légèrement soulevée en tournant autour de l'arête D de l'extrados, pour retomber ensuite en dedans de la galerie. On conçoit que ce genre de mouvement serait possible, même dans le cas où la voûte

(1) On sait en effet que les rayons de courbure d'une ellipse dont les deux demi-axes sont représentés par a et b, sont respectivement égaux à $\frac{a^2}{b}$ et $\frac{b^2}{a}$, aux points de la courbe situés aux extrémités des demi-diamètres b et a. Les pressions sur les plans de joint aboutissant à ces points seraient donc $p\,\frac{a^2}{b}$ et $p\,\frac{b^2}{a}$. Les épaisseurs de la voûte devant être proportionnelles à ces pressions, seraient entre elles comme $\frac{a^2}{b} : \frac{b^2}{a}$ ou $:: a^3 : b^3$.

serait très-chargée sur son sommet; il suffirait en effet, que les plans de joint MN et DE s'écrasassent dans le voisinage des arêtes N et D, sous les pressions que supportent les parties voisines de ces arêtes, pressions très-supérieures à celles qui auraient lieu dans l'hypothèse d'une répartition uniforme sur les plans de joint. Une voûte en plein cintre, et à plus forte raison une voûte surhaussée ou en ogive, serait donc, dans l'hypothèse admise d'une pression considérable d'une des parois, exposée à crouler par la rupture simultanée vers les reins et près de la clef. Il convient alors de construire une voûte surbaissée, dont la directrice soit un arc de cercle d'un assez grand rayon, et à laquelle on donne une épaisseur considérable. Si par exemple ABDA'B', *fig.* 9, *Pl.XV*, est une voûte semblable, établie dans une galerie ouverte sur un filon, dont AM, A'N sont le toit et le mur, il sera impossible que celte voûte soit renversée, par la pression du toit, de la manière qui a été indiquée précédemment, si l'angle AID formé par deux droites qui partant l'une du point A, à la naissance de la voûte, l'autre du point D, à la clef et à l'extrados, vont se couper en un point quelconque I de la courbe d'intrados, si cet angle, dis-je, a son sommet tourné vers l'intérieur de la galerie. Car dans le mouvement de renversement que nous avons supposé, un joint en I doit se fermer à l'intrados et s'ouvrir à l'extrados, tandis que le joint en D, doit s'ouvrir à l'intrados et se fermer à l'extrados. Cela exige que le point I sommet de l'angle AID se relève, et ce mouvement est impossible, puisque, par l'hypothèse, les points A et D ne peuvent que se rapprocher par la pression du toit. Or, l'angle AID aura toujours son sommet tourné vers l'intérieur de la galerie, quel que soit le point I, si la tangente AT menée au point A de la courbe d'intrados vient passer au-dessous du sommet D de la courbe d'extrados. Si l'on désigne par f la flèche D'K de la voûte; par e l'épaisseur DD'; par θ l'angle que la tangente AT forme avec la corde AA', égal à celui que le plan BA de l'assise taillée dans la roche forme avec le plan vertical; par c la demi-corde AK, on aura : $SK = c \text{ tang } \theta$, et le point D sera en dessus du point S, si $e + f$ est plus grand que SK. La condition, pour que la stabilité de la voûte soit arrêtée, sera donc exprimée par la relation :

$$e + f > c \text{ tang } \theta.$$

Si la courbe AD'A' est un arc de cercle, dont r est le rayon, on a : $D'K = f = r\,(1 - \cos\theta)$, $c = r \sin\theta$, et la condition précédente devient :

$$e + r(1 - \cos\theta) > r \sin\theta \text{ tang } \theta \text{ ou } \frac{e}{r} > \frac{1}{\cos\theta} - 1.$$

Pour un arc en plein cintre, on aurait $\theta = 90°$, cos $\theta = o$ et $\frac{e}{r}$ deviendrait infini. Les voûtes surbaissées sont donc les seules qui conviennent dans les cas que nous venons d'examiner, et ce sont en effet celles dont on fait usage. Nous citerons les règles suivies dans les mines de l'Erzgebirge en Saxe, où le muraillement est employé presque partout. Dans le cas où les parois latérales exercent une poussée comparable à la pression sur le faîte, la flèche de la voûte en arc de cercle est égale à $\frac{1}{10}$ de l'ouverture (2 pouces 1/2 par aune de 24 pouces), et l'épaisseur de la voûte est égale à 12 fois la flèche, 0m,71 (une aune 1/4 de Leipsick) pour 0m,06 de flèche. Quand les parois latérales n'exercent aucune poussée, on donne plus de hauteur à la voûte, et l'on emploie même le plein cintre. L'ouverture de la voûte dépend de la largeur du filon et n'excède généralement pas 1 mètre.

Exécution des galeries muraillées. — Dans un terrain tendre, tel que des argiles, et à une petite profondeur au-dessous de la surface, les galeries muraillées sont le plus souvent excavées en tranchée ouverte. On soutient provisoirement les parois de la tranchée qui sont coupées à pic, à moins que le terrain ne soit trop ébouleux, avec des traverses en bois qui s'appuient par leurs extrémités sur des planches appliquées contre les parois. Quand la tranchée est assez profonde pour que les terres ne puissent pas être lancées sur les bords d'un seul jet de pelle, on établit un ou plusieurs planchers intermédiaires, qui sont supportés par les étais transversaux, et l'on taille en forme de gradins l'extrémité antérieure de la tranchée. On établit d'abord les murs droits de chaque côté de la tranchée, et par dessus on construit à la manière ordinaire une voûte demi-circulaire, sur laquelle on rejette les terres qui ont été retroussées sur les bords. Le muraillement est exécuté par les maçons, en même temps que les terrassiers continuent le creusement de la tranchée.

On se contente souvent pour les galeries de ce genre, de murs en pierres sèches, dont les joints sont simplement garnis avec de la mousse, et auxquels on donne de 0m,50 à 0m,66 d'épaisseur. Ces murs conviennent même mieux que les murs avec mortier et ciment, dans les terrains qui sont perméables aux eaux, et qui n'exercent pas une très-grande poussée, surtout quand on a des matériaux de construction convenables, tels que des pierres de forme assez régulière et à larges assises. Les eaux qui traversent les terres passent entre les pierres et ne dégradent point le mur. Souvent même, la voûte est remplacée par de larges pierres plates, posées sur les deux murs latéraux.

Google

Quand la poussée du terrain est considérable, et qu'il est en même temps aquifère, il faut employer un mortier hydraulique pour lier la maçonnerie, et ménager à travers le mur, de distance en distance, des larmiers ou barbacanes, par lesquelles les eaux qui pénètrent le terrain arrivent dans l'intérieur de la galerie. Si le sol de la galerie est dépourvu de consistance, on couvre ce sol avec de forts madriers jointifs en bois de chêne, posés transversalement, et sur les extrémités desquels sont posés les murs latéraux, *fig.* 9, *Pl. XII.* Ces madriers forment le lit des eaux qui coulent sur le sol de la galerie, et l'on n'a point à craindre qu'ils se pourrissent, parce que les bois ainsi tenus constamment sous l'eau se conservent indéfiniment. La *Richesse minérale* de M. Héron de Villefosse, contient la description d'une galerie d'écoulement semblable, exécutée en tranchée ouverte, dans le pays de Tecklenbourg, au milieu d'un terrain mouvant, et à 40 pieds de profondeur au-dessous de la surface du sol (*Richesse minérale*, t. II, p. 182 et planche 9 de l'atlas).

Souvent aussi, dans le même cas, on construit au sol de la galerie un radier, ou plutôt une voûte renversée à très-petite flèche, sur laquelle viennent s'appuyer les murs latéraux, *fig.* 12, *Pl. XV.* On fait assez souvent cette voûte sans y employer de mortier, lorsque l'on peut se procurer à peu de frais des pierres faciles à dégrossir et de dimensions convenables. On procède à sa construction comme dans le cas des galeries exécutées souterrainement, dont nous allons nous occuper.

Dans les galeries exécutées souterrainement, lorsque le terrain ne présente pas de difficultés particulières, le muraillement de la galerie suit ordinairement à une petite distance, le creusement de l'excavation. Le terrain excavé sur les dimensions convenables pour recevoir le revêtement, a d'abord été étayé provisoirement avec des bois, partout où cela a été nécessaire. Si le sol est consistant, on se borne à le creuser à quelques centimètres de profondeur, pour asseoir les fondations des murs latéraux; on élève ceux-ci, soit en pierres sèches, soit en pierres ou briques liées avec un mortier hydraulique. On a soin d'enlever à mesure les étais provisoires en bois, et de ne laisser aucun vide entre le terrain et la maçonnerie. Les étais en bois latéraux, sont coupés par petites portions, à mesure que la maçonnerie s'élève, lorsque la faible consistance du terrain ne permet pas de les enlever en une seule pièce; on étançonne alors au besoin les parties supérieures de ces étais par des traverses horizontales, et l'on soutient les chapeaux par des poteaux verticaux, placés en dedans des murs latéraux. Ceux-ci étant suffisamment élevés, on met en place

les cintres qui doivent servir à la construction de la voûte, et qui sont posés sur des poteaux appliqués contre les parements verticaux intérieurs des murs. Sur les cintres, on pose les planches longitudinales qui supportent les matériaux de la voûte, et l'on exécute celle-ci, par petites portions successives; on a soin d'enlever, à mesure que la construction avance, tous les chapeaux ou étais de bois placés au-dessus de la voûte, et de remblayer complètement le vide existant entre l'extrados de celle-ci et le terrain, vide qui d'ailleurs est généralement peu considérable, parce que l'on exécute la voûte par petites portions successives.

Beaucoup de terrains qui ne manquent pas de solidité au moment où l'on vient d'y pratiquer des excavations, s'altèrent par l'influence de l'air humide et finissent par devenir ébouleux au bout d'un temps plus ou moins long. Dans les terrains de ce genre, le revêtement en maçonnerie doit être exécuté tout de suite.

Au contraire, dans d'autres terrains qui sont pénétrés d'eau, la poussée diminue, après que le terrain a été ouvert et asséché par la galerie qu'on y a creusée. Les terrains coulants des environs de Tarnowitz sont dans ce cas : ils se raffermissent par l'écoulement des eaux dont ils sont imbibés. Aussi, dans les mines de ce pays, on a l'habitude de revêtir d'abord les galeries, d'un boisage que l'on remplace par un muraillement, après avoir laissé écouler un temps assez long, insuffisant toutefois pour que le boisage provisoire ait été endommagé ou ait dû être réparé.

Substitution du muraillement au boisage, dans les terrains ébouleux. — Voici comment on exécute le muraillement de la galerie. Les parois et le faîte des galeries étant soutenus par des palplanches ou pieux que l'on a enfoncés dans le terrain, suivant la méthode applicable aux terrains très-ébouleux, on procède, comme il suit, à la substitution du muraillement au boisage. En supposant que le vide intérieur de la galerie soit suffisant pour contenir l'épaisseur des murs et de la voûte, on détermine d'abord le point où l'opération du muraillement sera commencée. On choisit un endroit où le terrain soit un peu plus solide que dans le reste de la galerie, et qui soit situé près de son extrémité la plus avancée. On exécute le muraillement en marchant de ce point vers l'orifice, parce qu'en opérant ainsi, les extrémités antérieures des palplanches, par lesquelles elles ont pénétré dans le terrain, sont les premières prises et soutenues par le revêtement en maçonnerie, ce qui permet d'enlever les chapeaux des cadres beaucoup plus facilement que si on marchait en sens contraire. A 2 mètres en avant du point que l'on a choisi, on établit en travers de

la galerie un batardeau en terre glaise qui s'élève au-dessus des eaux qui coulent sur le sol; on établit un batardeau semblable, mais un peu moins élevé, à 8 ou 10 mètres de distance du premier, vers l'orifice de la galerie, et l'on fait écouler dans des canaux en planches, posés sur les erétes de ces deux batardeaux, les eaux venant du fond, de manière à ce qu'on n'ait dans l'intervalle où la maçonnerie va être commencée que les suintemenls du terrain contigu, suintements que l'on tient facilement épuisés avec une petite pompe en bois ou de toute autre manière.

L'emplacemt étant ainsi préparé, on place des moises transversales à 0m,50 ou 0m,60 au-dessus du sol de la galerie, entre les montants verticaux de 3 ou 4 cadres consécutifs; on enlève ensuite la semelle du premier cadre, et l'on bâtit à la place une voûte renversée reposant sur le sol que l'on continue des deux côtés, à partir de l'axe de la galerie jusqu'à la rencontre des montants verticaux des cadres. Ceux-ci sont alors coupés en dessous des moises horizontales, et la maçonnerie du radier est continuée jusqu'aux palplanches qui garnissent les parois latérales. On termine cette voûte renversée par une assise horizontale sur laquelle poseront les murs latéraux. La maçonnerie a ordinairement 0m,55 d'épaisseur, et la corde de l'arc de cercle de l'intrados est plus petite d'environ 8 centimètres que la largeur dans œuvre que l'on veut laisser à la galerie, afin de laisser un cordon ou saillie large de 3 à 4 centimètres à la base des murs verticaux appliqués contre les parois La flèche de la voûte renversée est ordinairement de 18 à 20 centimètres; elle s'exécute, à partir de la clef, à droite et à gauche, avec un patron qui en donne la forme, et que l'on présente fréquemment. On la construit en pierres sèches, choisies avec soin; lors même que la pression du terrain est considérable, on ne fait point usage de mortier, quand le sol laisse arriver des quantités d'eaux abondantes, parce que le mortier serait enlevé par les eaux qui sourdent en dessous du radier, à mesure qu'on l'appliquerait.

Après l'achèvement du radier, on élève les murs verticaux sur les deux côtés jusqu'à la hauteur des naissances de la voûte. C'est la partie la plus facile du travail. On enlève à mesure les montants verticaux des cadres, par partie que l'on coupe à mesure que les murs s'élèvent; on arrache les palplanches appliquées contre le terrain autant qu'on le peut; on procède enfin à la construction de la voûte, qui s'exécute au moyen de cintres portés sur des poteaux verticaux placés en dedans des murs et recouverts par des planches. Cette construction est longue et difficile à cause de l'espace resserré dans lequel il faut travailler, de l'obligation d'enlever les bois supérieurs, et de ne pas laisser de vide au-dessus de la voûte.

Google

Après avoir ainsi complété le muraillement sur une longueur de 1m,50 à 2 mètres au plus dans les terrains difficiles, on continue de la même manière à murailler par portion, en marchant vers le batardeau inférieur, celui qui est le plus près de l'orifice de la galerie. On construit alors de nouveaux batardeaux, et on arrive jusqu'à l'orifice. Quant au revêtement de la galerie, sur la longueur comprise entre le muraillement déjà exécuté est l'extrémité, il s'exécute par portions successives de 0m,80 à 1m,30 au plus de longueur, à partir de la partie déjà muraillée, en ayant soin de joindre exactement une partie du muraillement à la partie précédente, et de laisser à cet effet des pierres d'attente. On ne décintre les portions successives de voûte que plusieurs jours après leur achèvement. Les murs ont environ 0m,50 à 0m,55 d'épaisseur. D'après M. Thürnagel un lachter courant (2m,08) d'un muraillement complet exécuté dans la galerie dite *Friedrichs stollenort*, à Tarnowitz, a exigé :

25,6 journées de maçons,
18,1 journées de manœuvres ou aides,
3,9 klafter de pierres,
4,4 tonnes de chaux,

et occasionné les dépenses suivantes :

	Reichtsth.	Sil. gros.	Pfenn.	Fr.	C.
Main-d'œuvre. . .	15	24	9	59	35
Matériaux. . . .	11	8	6	42	30
Ensemble. . .	27	3	3	101	65

(Les dimensions du klafter de pierres et de la tonne de chaux ne sont point indiquées dans le Mémoire de l'auteur, imprimé dans l'*Archiv für Bergbau*, etc., vol. IX)

Galerie muraillée sans boisage provisoire, exécutée au moyen d'arcs et de palplanches en fer. — Les *fig.* 14, 15, 16, 17, 18, 19 et 20, de la *Pl. XII*, représentant l'appareil employé pour le creusement et le muraillement immédiat, sans boisage provisoire, d'une galerie creusée dans un terrain éboulеux, dans la mine d'alun de Freienwald, sous la direction de M. Schmidt, Bergmeister à Rüdersdorf.

La fabrique d'alun de Freienwald emploie une pyrite de fer disséminée en particules invisibles à l'œil dans la masse exploitée, qui est un mélange intime de lignite et d'argile formant une couche assez irrégulière dont le toit et le mur sont des bancs de sable sans cohésion.

Une galerie servant à la fois à l'écoulement des eaux et au transport souterrain suit à peu près la direction de la couche, tout en pénétrant fréquemment, soit dans le toit, soit dans le mur du gîte. Cette galerie a dans œuvre 6 pieds de haut et 5 pieds 1/2 de large (pieds du Rhin); les murs latéraux sont verticaux et supportent une voûte demi-circulaire. Le sol est assez résistant tant qu'il est sur le sable et qu'il n'y a pas une forte affluence d'eaux; mais comme il fallait se mettre à l'abri des mouvements qu'auraient pu occasionner des eaux abondantes, et que d'ailleurs le sol de la galerie se trouve sur certains points dans le lignite, il était nécessaire de construire au sol une voûte renversée pour supporter les murs latéraux. La pression n'étant pas très-forte, le revêtement n'a qu'une épaisseur de 10 pouces égale à la longueur d'une brique; il est exécuté en briques bien cuites, jointes par un mortier ordinaire. L'appareil en fer soutient les terres sur une longueur d'un lachter (6 pieds 8 pouces) en avant du muraillement, ce qui suffit pour les deux ouvriers qui travaillent alternativement à excaver le terrain et à faire suivre le muraillement. Il consiste en trois arcs en fer *fig.* 14 et 15, *Pl. XII*, capables de soutenir le revêtement de la galerie. Ces arcs ont 6 pieds 10 pouces de hauteur, 7 pieds 2 pouces de large, et sont formés de trois parties, savoir : la pièce du sol et les deux arcs latéraux qui se joignent avec recouvrement au sommet de l'arc supérieur, et sont solidement réunis par deux boulons à vis. Le fer a 3 pouces 1/2 de hauteur sur 1 pouce de largeur ; à la partie extérieure, les arcs ont un pouce 1/2 de large. Au bas de chaque demi-arc, un tenon d'un demi-pouce de long et d'un pouce de côté entre dans les trous pratiqués dans la pièce du sol, épaisse de 1/2 pouce et large de 3 pouces. A une distance de 2 pieds du tenon inférieur, chaque demi-arc est percé d'un trou, dans lequel passe un boulon en fer de 3/4 de pouce de diamètre, destiné à relier entre eux les 3 arcs en fer, placés à distances égales le long de la galerie. Les pièces en fer du sol reposent sur des pièces de bois de 4 à 5 pouces d'équarissage, qui sont divisées au milieu, afin qu'on puisse les déplacer plus facilement. Les trois arcs que nous venons de décrire sont à 20 pouces les uns des autres. Ils sont garnis sur le contour extérieur de 40 planches (*abtreibepfahle*) en fer forgé, dont chacune a 7 pieds de long, 4 pouces de large, et de 1/2 à 1/4 de pouce d'épaisseur. Ces planches sont tranchantes à leur extrémité antérieure, percées de deux trous près de cette même extrémité, et de 7 trous près de l'extrémité postérieure. Ces trous, qui ont 1 pouce de diamètre, et sont distants de 3 pouces environ l'un de l'autre, reçoivent les bouts de barres ou leviers en fer dont on se sert pour pousser les plan-

chesenavant, en les faisant glisser entre le terrain et les arcs en fer qui les supportent. Les planches les plus épaisses, d'un demi-pouee, sont placées vers le faîte, et les plus minces vers le bas. Il serait même convenable de donner une plus forte épaisseur aux planches du faîte, parce qu'elles fléchissent entre les arcs qui les supportent, ce qui rend leur enfoncement dans le terrain plus difficile.

De cette manière, le faîte et les parois latérales de la galerie sont soutenus par les planches en fer jointives, placées derrière les arcs. La face antérieure de l'excavation est d'ailleurs soutenue de la manière suivante : un fort poteau de bois est placé verticalement au milieu de la galerie, dans le plan de l'arc le plus rapproché du front de l'excavation. Ce front est garni de planchettes placées transversalement, juxtaposées, et maintenues en contact avec le terrain par des traverses de bois légèrement inclinées, qui s'appuient contre le poteau vertical dont nous venons de parler, *fig.* 14, *Pl. XII.*

Pour avancer le travail, on ôte les planchettes qui garnissent le front de la galerie près du faîte. On excave sur une profondeur de 10 à 12 pouces, et on avance les planches en fer d'autant, en les faisant glisser au moyen de leviers en fer plantés dans les trous. On maintient l'écartement nécessaire des extrémités antérieures des planches au moyen de coins (*pfandkeile*), que l'on enfonce comme dans la méthode ordinaire, entre celles-ci et le contour du cadre antérieur. On replace les planchettes au fond de l'entaille que l'on a faite, et l'on passe ensuite à une tranche inférieure. Quand on a ainsi avancé l'excavation de 20 pouces, on enlève l'arc le plus éloigné de l'extrémité de la galerie, et on le replace tout contre le terrain. On réunit de nouveau les trois arcs par les boulons horizontaux, et l'on exécute en arrière, dans l'espace soutenu par les extrémités postérieures des planches en fer, un arceau de 20 pouces de large, qui se lie à la maçonnerie déjà faite. Pour l'exécution du muraillement, on se sert de cintres en fer recouverts par des planches.

Ce mode de creusement n'exige aucun boisage; ce qui constitue un grand avantage sur le mode ordinaire de travail, où presque tout le boisage provisoire est abîmé, ou demeure perdu derrière le muraillement, et où l'on doit d'ailleurs donner à l'excavation primitive des dimensions beaucoup plus grandes, à cause des fortes dimensions des bois employés.

L'appareil entier, composé de 4 arcs en fer dont 1 de réserve, et de 45 planches (*abtreibepfähle*), pèse 23 quintaux 80 livres.

Galerie sous la Tamise entre Rotherhitte et Wapping. — Le procédé de creusement dont on a fait usage à la mine de Freienwald est analogue à celui qu'a suivi M. Brunel, pour creuser le grand sou-

terrain entre Wapping et Rotherhitte, sous la Tamise, et au procédé généralement employé par les mineurs pour l'exécution des galeries boisées, dans les terrains sans consistance. Dans l'exécution du souterrain sous la Tamise, le front de la galerie était soutenu par un large bouclier en fer, dont la surface était divisée en 36 compartiments fermés par autant de plaques mobiles, susceptibles d'être poussées en avant, tandis que le bouclier restait en place. Le bouclier était bordé par un cadre à bords tranchants, et on l'enfonçait dans le terrain à l'aide de vis de pression. On le poussait en avant de 4 à 5 pouces anglais seulement en une fois, et l'on exécutait immédiatement en arrière un anneau de muraillement de largeur égale, qui était construit en briques et en ciment romain.

Creusement des galeries à grande section. — Les galeries de mines sont toujours excavées en une seule fois sur leurs hauteur et largeur totales. Les galeries à grande section que l'on exécute sur le tracé des grandes routes, des canaux et des chemins de fer, sont au contraire excavées en plusieurs parties qui sont, s'il est nécessaire, muraillées successivement. Dans une roche dure et consistante, qui n'a pas besoin de revêtement, le front de l'excavation est taillé en gradins droits, de façon à pouvoir occuper un poste d'ouvriers devant chaque gradin. L'excavation voisine de la partie supérieure est ainsi en avant du reste. Cette méthode a le double avantage de rendre le creusement meilleur marché, en dégageant la roche sur la face horizontale supérieure au moyen de l'excavation du faîte, et d'accélérer le creusement en occupant à la fois un plus grand nombre d'ouvriers.

Quand la galerie doit être muraillée, on peut procéder à peu près de la même manière. Ainsi on peut creuser d'abord l'excavation voisine du faîte de la galerie sur des dimensions suffisantes pour contenir le muraillement, exécuter le muraillement de cette partie en posant les cintres en bois de la voûte, sur de fortes poutres transversales posées sur le sol de cette première excavation, et qui pénètrent par leurs extrémités dans la roche intacte. La maçonnerie repose elle-même aux naissances, sur de fortes pièces de bois longitudinales posées sur les pièces transversales dont nous venons de parler, *fig.* 11, *Pl. XV*. Quand le cerveau de l'excavation est muraillé, on excave le terrain en dessous des poutres transversales, en ayant soin de soutenir celles-ci, s'il est nécessaire, par des étais provisoires en bois, qui sont de simples poteaux convenablement placés. Le terrain étant enlevé, la maçonnerie qui revêt le faîte de l'excavation repose sur les pièces de bois placées d'abord. On exécute alors le revêtement en maçonnerie de la partie inférieure de l'excavation, qui consiste le plus souvent en une portion de

voûte renversée formant radier au sol de la galerie, et en deux murs droits ou en arcs d'ellipse qui soutiennent les parois latérales et constituent les pieds-droits de la voûte supérieure précédemment exécutée. On raccorde les pieds-droits avec les naissances de cette voûte : il ne reste plus ensuite qu'à couper les poutres transversales au ras des murs, et à extraire les portions de bois prises dans la maçonnerie pour les remplacer par des pierres.

Quand la largeur de la galerie doit être considérable, et que la roche manque de solidité, au lieu d'enlever la totalité de la roche comprise dans le vide intérieur de la galerie projetée, on creuse deux galeries latérales sous les naissances de la voûte supérieure, sur une largeur suffisante pour contenir les murs latéraux, et laisser l'espace nécessaire pour l'avancement des matériaux à pieds d'œuvre et l'exécution du travail. On laisse subsister entre ces deux galeries latérales un noyau de roche sur lequel portent par leur milieu les poutres transversales qui forment la corde des cintres supérieurs. On étaye par des poteaux en bois inclinés les extrémités de ces poutres, qui sont en dessus des galeries nouvelles; on élève la maçonnerie latérale, que l'on raccorde avec celle de la voûte : il ne reste plus ensuite qu'à enlever le noyau de roche resté entre les galeries jumelles, et à construire, s'il est nécessaire, le radier en voûte renversée au sol de la galerie. Ces dernières parties du travail ne présentent aucune difficulté.

Galerie souterraine de Terrenoire. — La galerie souterraine de Terrenoire, entre Saint-Étienne et Saint-Chamond, sur le chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, et le souterrain des Batignolles, sur le chemin de fer de Paris à Saint-Germain, nous offrent des exemples des procédés décrits ci-dessus.

La galerie de Terrenoire, qui a 1480 mètres de longueur, et dont la section est une ellipse tronquée vers le bas et fermée par un arc de cercle dont la flèche est de 0m,20 seulement, *fig.* 10 et 11, *Pl XV*, a été attaquée aux deux extrémités, et au bas de 7 puits foncés sur la direction, dont les profondeurs étaient :

	Mètres.
Puits n° 1.	31
— 2.	59
— 3.	86,40
— 4.	52
— 5.	41
— 6.	18
— 7.	13

Le puits n° 6 s'est éboulé et a été abandonné; le puits n° 7 était à une petite distance du précédent.

Tous ces puits avaient 2 mètres de diamètre intérieur; ils étaient établis dans un terrain peu dur, et sont revenus à un prix variable depuis 25 fr. jusqu'à 75 fr. le mètre courant, suivant la dureté du rocher et la profondeur.

Le percement a été commencé par le creusement des puits vers la fin de 1826; la communication à jour d'un bout à l'autre était établie, au cerveau de la galerie, vers la fin de 1830. Dans les parties dures, le mètre cube de roche excavé et extrait est revenu d'abord à 17 fr. : ce prix est ensuite descendu à 13 fr. par la concurrence des entrepreneurs. Il y avait peu de roche de cette nature. L'excavation, dans les endroits où le muraillement était nécessaire, avait les dimensions suivantes, *fig.* 10, *Pl XV.* Hauteur, 6m,30; largeur, 4m,40 au milieu, 3 mètres à 1 mètre au-dessous du sommet, 3m,80 près de la base.

La maçonnerie, exécutée en deux parties par le procédé que nous avons fait connaître, c'est-à-dire en commençant par excaver et murailler le cerveau, était payée à raison de 4 fr. le mètre carré de briques. Les matériaux étaient transportés à l'embouchure des puits, et les entrepreneurs n'avaient à leur charge que la descente dans les puits et le roulage intérieur. Le revêtement avait au plus 0m,50 d'épaisseur, et l'on y employait des briques de 10 pouces de long sur 4 de large, et 2 d'épais. Le revêtement en moellon piqué était payé à raison de 6 fr. le mètre carré.

Ces prix sont excessifs; ce qui paraît tenir au danger auquel les maçons étaient exposés, et qu'on aurait pu éviter au moins en partie. Les mineurs avançaient d'environ 6 à 10 mètres d'excavation en cerveau dans le rocher tendre, et se reportaient dans le chantier opposé de l'autre côté du puits pour laisser voûter le cerveau. La façon du mètre carré de maçonnerie ordinaire, sur 0m,50 d'épaisseur en moellon piqué, ne revient guère, dans le département de la Loire, qu'à 1 fr. 50 c., les matériaux étant rendus à pied d'œuvre. Les briques de 2 pouces, sur 4 pouces et 10 pouces revenaient de 22 à 24 fr. le 1000, rendues à l'orifice des puits.

Galerie souterraine des Batignolles. — Les figures 1, 2, 3, 4 et 5, *Pl. XV*, représentent le mode suivi pour l'excavation du souterrain des Batignolles.

La figure 1 est la section d'une première galerie boisée qui fut d'abord exécutée surtoute la longueur du souterrain. La position de cette galerie est indiquée en ABCD, dans le profil en long, *fig.* 4. On plaça

dans cette galerie une voie de fer pour le transport des déblais à l'extérieur, et des matériaux à l'intérieur. La figure 2 représente la forme de l'excavation capable de contenir la voûte, faite à partir de la petite galerie, *fig.* 1, et le mode de soutènement provisoire employé. Il consiste en étais de bois disposés en éventail, appuyés par le bas sur une forte semelle transversale en bois posée sur le sol, et soutenant le terrain supérieur contre lequel ils s'appuient par le bout, avec interposition de madriers en bois, qui vont d'un étai à l'étai voisin. L'excavation ainsi soutenue est représentée par la partie BEFG du profil en long, *fig.* 4.

La figure 3 est la section verticale de l'un des cintres que l'on intercalait au milieu de la distance de deux systèmes d'étais voisins semblables à ceux de la *fig.* 2. Ces cintres aidaient encore à soutenir le terrain supérieur au moyen d'étais courts intercalés entre eux et le terrain. Ces systèmes d'étais remplaçaient ceux de la *fig.* 2, à mesure que l'on était obligé d'enlever ceux-ci pour exécuter la voûte. La partie EHIF du profil en long, *fig.* 4, représente la partie de l'excavation où les cintres sont placés. On construisait ensuite la voûte. La partie HLMI du même profil représente la portion de l'excavation où la voûte est en construction.

Cette voûte terminée, on procédait au creusement des galeries jumelles, devant contenir les parois latérales ou pieds-droits de la voûte. La figure 5 représente ces galeries, le système d'étais employés pour soutenir les extrémités des poutres transversales portant les cintres, le noyau plein laissé au milieu, et la maçonnerie exécutée.

Les fondations des pieds-droits sont en béton. La nature du terrain n'a point exigé l'établissement d'un radier entre les pieds-droits. Les fondations s'enfoncent de $1^{m},25$ environ dans le terrain solide, au-dessous du plan de pose des rails qui est indiqué par la ligne horizontale LM, *fig.* 5. On a coulé sur la voûte une couche de bitume, et par dessus une couche de béton.

Les matériaux étaient envoyés du jour par plusieurs puits verticaux creusés aux extrémités des diagonales de rectangles qui avaient pour côtés les projections horizontales du parement extérieur de la maçonnerie. Ces puits, qui furent foncés jusqu'au niveau du sol du souterrain, ont été ensuite remblayés complètement.

Dans des terrains médiocrement solides, tels que la craie ordinaire, on a suivi en Angleterre et dans les travaux du chemin de fer de Rouen, une méthode plus expéditive que la précédente. Voici à peu près comment on a procédé dans le percement du souterrain, entre Rolleboise et

Digitized by Google

Bonnières, sur le chemin de Rouen. La roche était de la craie généralement assez solide, mais quelquefois aussi, dépourvue de solidité, et contenant une grande quantité de silex qui y forment sur quelques points des lits de 60 à 80 centimètres d'épaisseur. On commença par creuser au sol du souterrain et suivant son axe, une première galerie d'environ 2 mètres de largeur dans œuvre sur autant de hauteur. Cette galerie, solidement boisée partout où le terrain manquait de solidité, fut attaquée par ses deux extrémités, et au bas de dix puits verticaux creusés sur son axe, ayant depuis 40 jusqu'à 82 mètres de profondeur. On y établit un chemin de fer sur lequel circulaient de grands waggons pour le transport des déblais au dehors, ou au bas des puits verticaux.

En même temps, on pratiqua vers la partie supérieure du souterrain, et suivant son axe, une autre galerie de dimensions plus petites que la première, et qui ne fut pas même exécutée sur toute la longueur.

Dans les endroits où la roche ne manquait pas de solidité, on put enlever, par places, tout le massif qui remplissait l'espace à excaver, en attaquant simultanément ce massif à partir de la galerie inférieure et de la galerie supérieure. Voici comment on procédait : sur une longueur de 4 mètres environ, mesurés suivant l'axe du souterrain, on attaquait la roche des deux côtés de la galerie supérieure et de la galerie inférieure ; on pratiquait ainsi une excavation de 4 mètres de longueur, et dont la section transversale était celle du souterrain, y compris l'épaisseur du revêtement en maçonnerie. On soutenait la roche au moyen de poutres appliquées contre le contour de l'excavation, dirigées parallèlement à l'axe de celle-ci, et dont les extrémités reposaient dans des entailles pratiquées dans la roche formant les parois verticales extrêmes de la portion élargie. Au besoin, on plaçait des bois de garnissage entre la roche et les poutres longitudinales.

L'excavation étant ainsi préparée, on élevait d'abord la maçonnerie qui devait former les pieds-droits de la voûte, puis on mettait en place les cintres en bois, et on construisait la voûte en briques qui devait former le revêtement de la partie cintrée de l'excavation. Ce revêtement était construit du dedans de la galerie, s'élevait à la fois des deux côtés, et à mesure qu'il s'élevait, on avait soin d'enlever les poutres longitudinales devenues inutiles, et même les bois de garnissage que l'on évitait, autant que possible, de laisser derrière la maçonnerie.

On a pu, ainsi, commencer à la fois l'élargissement du souterrain sur plusieurs points distants les uns des autres, et travailler à l'élargissement sur certains points, en même temps qu'on travaillait à revêtir les parties déjà élargies. Quand un espace à élargir était contigu

à un espace déjà élargi et revêtu en maçonnerie, le travail était absolument le même, avec cette seule différence, que les poutres longitudinales appliquées contre la roche et destinées à la soutenir provisoirement, avaient une de leurs extrémités appuyée sur la maçonnerie déjà faite, et l'autre extrémité appuyée sur la roche taillée verticalement et limitant la partie élargie.

Dans les parties où le terrain manquait de solidité, cette méthode n'aurait pu être suivie. On procédait alors à peu près comme on l'a fait pour le souterrain de Terrenoire, c'est-à-dire qu'on enlevait d'abord la roche au cerveau de l'excavation, en partant de la galerie supérieure. On soutenait le terrain par des poutres longitudinales appuyées sur des étais disposés en éventail, et dont les pieds portaient sur des poutres transversales, formées de deux parties assemblées au milieu en trait de Jupiter. On enlevait ensuite la roche latéralement à la galerie inférieure, en dessous de ces poutres que l'on étayait à mesure avec des poteaux appuyés sur le sol. La roche étant ainsi complètement enlevée, on bâtissait les pieds-droits. On eût construit un radier, s'il eût été nécessaire. On mettait ensuite les cintres en place, pour la construction du revêtement de la partie supérieure; ces cintres établis dans les plans verticaux intermédiaires entre les verticaux des poutres transversales et des étais en éventail, peuvent en outre fournir de nouveaux points d'appui provisoires pour étayer les poutres transversales.

La méthode que nous venons de décrire en dernier lieu, nous paraît applicable, sauf quelques modifications qui varieront suivant les cas, à toutes les galeries souterraines de grandes dimensions, pratiquées dans des terrains qui ne sont pas absolument dépourvus de solidité. L'excavation préalable de la galerie de fond où l'on établit un roulage avec de grands waggons, permet d'attaquer la grande excavation par beaucoup de points à la fois, et d'opérer économiquement le transport des déblais à l'extérieur, et des matériaux de construction à l'intérieur.

La petite galerie exécutée au dôme, permet de pousser le travail plus rapidement, dans les parties de la roche qui sont suffisamment solides, et de procéder au boisage et au creusement de haut en bas, dans les parties où la roche est assez peu consistante pour exiger un boisage plus serré en éventail. Enfin, le mode de boisage réunit la simplicité à l'économie. La *fig.* 6, *Pl. XV*, est une section transversale du souterrain de Rolleboise; la partie à droite représente l'excavation étayée, comme elle l'était dans les parties les moins solides avant le muraillement. La partie à gauche représente la galerie muraillée et les

cintres qui servent à la construction de la voûte. AB est la demi-longueur de l'un des chapeaux de la galerie de service pratiquée d'abord au sol et dans l'axe du souterrain.

Muraillement discontinu, ou en arceaux. — Revenant aux revêtements en maçonnerie des galeries de mines, nous ajouterons que le muraillement complet peut quelquefois être remplacé par des arceaux jetés de distance en distance, ou par des chaînes en pierres équidistantes dont les intervalles sont remplis par un léger revêtement en briques. Les excavations très-élevées, celles par exemple qui devraient contenir des roues hydrauliques à chute supérieure d'un grand diamètre, sont voûtées en ogives. De semblables excavations, quand elles sont pratiquées dans des terrains qui ont une assez forte poussée, ne peuvent être consolidées que par des murs d'une très-grande épaisseur.

Muraillement de quelques excavations de formes particulières. — Les chambres dans lesquelles on voudrait établir des machines ou des chaudières à vapeur, doivent toujours être muraillées; elles sont ordinairement voûtées en berceau cylindrique. On établit aussi quelquefois des manéges ou baritels à chevaux souterrains; les excavations destinées à les contenir, doivent avoir une forme circulaire et être recouvertes d'une voûte en dôme. Elles sont généralement très-coûteuses et d'un établissement difficile. On peut presque toujours obtenir par d'autres dispositions, ou par des manéges établis à la surface, les résultats d'un manége établi souterrainement; il faut donc se dispenser d'avoir recours à ces constructions dispendieuses et qui génent le plus souvent le développement des travaux d'exploitation.

Croisements des galeries. — Lorsque deux galeries muraillées en berceaux se rencontrent ou se croisent, les raccordements se font habituellement sans voûtes d'arêtes et sans constructions compliquées. On se borne à surhausser la voûte en berceau de l'une des galeries au point de croisement, de façon que la voûte de l'autre galerie ne pénètre qu'un mur plan. Le berceau le plus élevé s'appuie sur la voûte inférieure. Les briques sont les matériaux les plus faciles à mettre en œuvre pour les travaux de ce genre, qui sont exécutés avec solidité, économie et promptitude, par des ouvriers habitués à en faire usage.

Le prix du revêtement en maçonnerie des galeries souterraines, dépend de celui des matériaux dans le pays. Il faut, dans les devis, ajouter au prix que coûteraient les constructions au jour, et qui peut être exactement déterminé dans chaque cas, les frais de transport des matériaux à pied d'œuvre, et une somme représentant les difficultés additionnelles du travail souterrain. Cette dernière n'est d'une évaluation difficile, que lorsqu'on a à craindre des éboulements.

Il est généralement économique de faire exécuter à l'entreprise les travaux de muraillement. Mais il est indispensable, dans ce cas, d'exiger de bonnes garanties de l'entrepreneur, et d'exercer pendant l'exécution des travaux une surveillance extrêmement assidue, sans laquelle il est presque certain que ces travaux seront mal faits, attendu qu'une vérification sérieuse est impossible après leur achèvement. Nous conseillerons en conséquence, de faire toujours exécuter à la journée et en régie, les travaux entrepris dans des terrains ébouleux, ou susceptibles d'exercer de fortes poussées.

FIN DU TOME PREMIER.

5682236

Digitized by Google

Digitized by Google





Google